

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ВОСКОБОЙНИК ЄВГЕН КОСТЯНТИНОВИЧ**

УДК 681.536.55

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**«АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНЕ КЕРУВАННЯ  
АВТОНОМНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ОПАЛЕННЯМ У БАГАТОКІМНАТНИХ  
БУДІВЛЯХ З УРАХУВАННЯМ КОМПЛЕКСНИХ ПОКАЗНИКІВ  
ТЕПЛОВОГО КОМФОРТУ»**

Спеціальність 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

(Галузь знань 15 - Автоматизація та приладобудування)

Подається на здобуття наукового ступеня доктор філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Є. К. Воскобойник

Науковий керівник : Бойко Олег Олександрович, кандидат технічних наук, доцент

Дніпро – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Воскобойник Є.К. Автоматизація та комп'ютерно-інтегроване керування автономним електричним опаленням у багатокімнатних будівлях з урахуванням комплексних показників теплового комфорту. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», МОН України, Дніпро, 2025.

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка присвячена розробці та дослідженню методів і засобів автоматизованого керування системами тепlopостачання. У цій дисертаційній роботі на основі отриманих теоретичних та експериментальних результатів, вирішено актуальну науково-технічну задачу автоматизації процесу керування опаленням багатокімнатних будівель на основі індексів теплового комфорту PMV та PPD відповідно до вимог стандарту ISO 7730:2005, шляхом розробки й використання інформаційного, програмного та технічного забезпечення засобів автоматизації.

Метою дисертаційного дослідження є розробка науково обґрунтованих підходів до енергоефективного керування процесами опалення у приміщеннях будівель шляхом формування керуючих впливів в системі керування які забезпечують комфортні умови перебування людини та мінімізацією споживання енергетичних ресурсів.

Об'єкт дослідження – процес керування параметрами теплового комфорту у внутрішньому середовищі будівельних приміщень, що забезпечує відповідність мікрокліматичних умов нормативним вимогам та індивідуальним потребам користувачів. Предмет дослідження – методи та засоби автоматизованого керування автономними електричними системами опалення, орієнтовані на досягнення оптимального теплового комфорту з урахуванням енергоефективності та адаптивності до змін зовнішніх і внутрішніх факторів.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 64 найменувань та 1 додатка.

У вступі зазначено актуальність теми досліджень, сформульовано мету, об'єкт, предмет і основні завдання досліджень, обґрунтовано методи досліджень, викладено наукову новизну й практичну значимість одержаних результатів, зазначено особистий внесок здобувача, представлено загальну характеристику та структуру дисертації, а також наведено відомості щодо публікацій і результатів апробації й упровадження дисертаційної роботи.

Перший розділ присвячено інформаційному аналізу актуального стану науково-прикладних досліджень та інженерно-технічних рішень у сфері автоматизованого керування теплотехнічними об'єктами та процесами, а також локалізації мети, об'єкту, предмету та основних пріоритетних напрямків і задач з удосконалення й подальшого розвитку відомих автоматизованих технологій комп'ютерно-інтегрованого керування системами теплопостачання.

У другому розділі наведено результати розробки моделі системи опалення багатокімнатного приміщення, орієнтовану на забезпечення теплового комфорту людини. Визначено структуру та математичні моделі основних компонентів – нагрівача, приміщення та датчика температури, а також моделі збурень, що впливають на тепловий баланс. Це дозволило створити основу для побудови гнучкої та енергоефективної автоматизованої системи опалення, здатної адаптуватися до змін зовнішніх умов. Розроблена система забезпечує підтримку оптимальних параметрів мікроклімату відповідно до індексів PMV та PPD, що дає можливість поєднати комфорт користувачів з енергоефективністю та технологічною гнучкістю.

Третій розділ присвячено дослідженню потенціалу зниження енерговитрат шляхом адаптивного керування системою опалення на основі індексів теплового комфорту PMV та PPD. Показано переваги комплексної оцінки мікроклімату над традиційним підходом, що базується лише на підтримці температури, та доведено її ефективність у забезпеченні індивідуального комфорту користувачів. Розроблено систему керування тепловим комфортом з автоматичним налаштуванням на базі двопозиційного регулятора, яка забезпечує простоту реалізації, стабільність роботи

та енергоефективність у змінних умовах експлуатації. Сформульовано наукові положення, що підтверджують доцільність використання комплексного параметра комфорту як критерію керування та визначають принципи налаштування регулятора для забезпечення оптимальної роботи системи.

У четвертому розділі дисертації було представлено реалізацію апаратно-програмної системи керування тепловим комфортом, що включає релейний модуль, контролер WEMOS D1 R32 та SCADA-систему zenon Supervisor 7.10. Система забезпечує вимірювання параметрів мікроклімату, керування нагрівачем, візуалізацію та розрахунок індексів PMV і PPD. Випробування підтвердили відповідність системи технічним вимогам, стабільність роботи, точність вимірювань та можливість інтеграції у сучасні промислові та побутові системи опалення. Результати дослідження доводять ефективність запропонованого підходу у зниженні енерговитрат та забезпеченні високого рівня теплового комфорту.

У загальних висновках наведено основні кількісні та якісні результати дисертаційного дослідження.

У додатку наведено акт впровадження та використання результатів дисертаційного дослідження.

Наукова новизна результатів дисертації: запропоновано підхід до автоматизованого керування автономним електричним опаленням, який базується на адаптивному сценарному моделюванні теплового комфорту з урахуванням індивідуальних потреб користувачів та змін зовнішніх кліматичних умов; розроблено математичну модель взаємозв'язку між параметрами мікроклімату приміщення та рівнем енергоспоживання, що дозволяє формувати компромісні режими опалення з урахуванням нормативних показників теплового комфорту; обґрунтовано доцільність використання інтелектуальних алгоритмів керування для оптимізації процесу регулювання температурного режиму в реальному часі з метою зниження енергетичних витрат; запропоновано методику оцінювання ефективності енергоспоживання будівель, яка враховує не лише технічні характеристики інженерних систем, а й поведінкові фактори користувачів, що впливають на теплове навантаження; удосконалено підходи до інтеграції систем автоматизованого

опалення у загальну інфраструктуру енергоменеджменту будівель, що сприяє підвищенню рівня енергоефективності на муніципальному та промисловому рівнях.

Практичне значення отриманих результатів досліджень мають суттєве практичне значення для підвищення енергоефективності будівель та оптимізації процесів теплопостачання, зокрема: Розроблений підхід до автоматизованого керування опаленням на основі комплексного параметра теплового комфорту може бути впроваджений у системи автономного електричного опалення житлових, адміністративних та промислових будівель, що дозволяє знизити витрати енергії без втрати якості мікроклімату. Запропонований алгоритм адаптивного регулювання забезпечує стабільну роботу системи керування в умовах змінних зовнішніх та внутрішніх факторів, що особливо актуально для регіонів із нестабільними кліматичними умовами або змінним графіком використання приміщень. Моделі та методики, розроблені в межах дослідження, можуть бути використані при проектуванні та модернізації систем енергоменеджменту будівель, а також інтегровані в платформи «розумного дому» для підвищення рівня автоматизації та енергоефективності. Результати дослідження можуть бути застосовані у навчальному процесі при підготовці фахівців у галузі енергетики, автоматизації та будівельних технологій, а також слугувати основою для подальших прикладних досліджень у сфері енергоефективного керування мікрокліматом. Експериментальні дані та моделювання підтверджують доцільність впровадження запропонованих рішень у практику енергозбереження, що може бути використано органами місцевого самоврядування та підприємствами для оптимізації витрат на комунальні послуги.

**Ключові слова:** керування, тепловий комфорт, моделювання, алгоритм керування, мікроклімат, система, енергоефективність, комп'ютерно-інтегрована технологія, автоматизація, опалення

## ABSTRACT

*Voskoboinyk Ye. K. Automation and computer-integrated control of autonomous electric heating in multi-room buildings taking into account complex thermal comfort indicators. – Qualification work as a manuscript.*

Thesis for a scientific degree of Doctor of Philosophy (Ph.D.) in specialty 151 – Automation and Computer-Integrated Technologies. – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2025.

The dissertation is a completed research work devoted to the development and study of methods and means of automated control of heating supply systems. Based on the obtained theoretical and experimental results, the dissertation solves the relevant scientific and technical problem of automating the heating control process in multi-room buildings using thermal comfort indices PMV and PPD in accordance with ISO 7730:2005, through the development and application of informational, software, and technical tools of automation.

The aim of the dissertation research is to develop scientifically grounded approaches to energy-efficient control of heating processes in building premises by forming a compromise solution between ensuring comfortable conditions for human occupancy and minimizing energy resource consumption.

The object of research is the process of controlling thermal comfort parameters in the indoor environment of building premises, ensuring compliance of microclimatic conditions with regulatory requirements and individual user needs. The subject of research is the methods and means of automated control of autonomous electric heating systems aimed at achieving optimal thermal comfort with consideration of energy efficiency and adaptability to external and internal factors.

The dissertation consists of an introduction, four chapters, general conclusions, a list of 64 references, and 1 appendices.

The introduction outlines the relevance of the research topic, formulates the aim, object, subject, and main tasks, substantiates research methods, presents scientific novelty and practical significance of the results, indicates the personal contribution of the author,

provides general characteristics and structure of the dissertation, and lists publications and results of approbation and implementation.

The first chapter is devoted to an informational analysis of the current state of applied research and engineering solutions in automated control of thermal engineering objects and processes, as well as localization of the aim, object, subject, and main priority directions and tasks for improvement and further development of known computer-integrated heating supply control technologies.

The second chapter presents the results of developing a model of a multi-room heating system oriented toward ensuring human thermal comfort. The structure and mathematical models of the main components – heater, room, and temperature sensor – as well as disturbance models affecting thermal balance are defined. This created the basis for building a flexible and energy-efficient automated heating system capable of adapting to external changes. The developed system maintains optimal microclimate parameters according to PMV and PPD indices, combining user comfort with energy efficiency and technological flexibility.

The third chapter investigates the potential for reducing energy consumption through adaptive heating control based on PMV and PPD indices. The advantages of comprehensive microclimate assessment over the traditional temperature-only approach are demonstrated, proving its effectiveness in ensuring individual user comfort. A thermal comfort control system with automatic adjustment based on a two-position regulator was developed, ensuring simplicity of implementation, operational stability, and energy efficiency under variable conditions. Scientific provisions are formulated confirming the feasibility of using a comprehensive comfort parameter as a control criterion and defining regulator tuning principles for optimal system operation.

The fourth chapter presents the implementation of a hardware-software thermal comfort control system including a relay module, WEMOS D1 R32 controller, and zenon Supervisor 7.10 SCADA system. The system provides microclimate parameter measurement, heater control, visualization, and PMV/PPD calculation. Tests confirmed compliance with technical requirements, operational stability, measurement accuracy, and integration capability into modern industrial and residential heating systems. The results

prove the effectiveness of the proposed approach in reducing energy consumption and ensuring high thermal comfort.

General conclusions summarize the main quantitative and qualitative results of the dissertation research. The appendix contains the act of implementation and use of the results of the dissertation research.

Scientific novelty of the dissertation results: a new approach to automated control of autonomous electric heating based on adaptive scenario modeling of thermal comfort considering individual user needs and external climate changes is proposed; mathematical model of the relationship between indoor microclimate parameters and energy consumption is developed, enabling compromise heating modes that meet regulatory comfort indices; the feasibility of using intelligent control algorithms for real-time optimization of temperature regulation to reduce energy consumption is substantiated; methodology for evaluating building energy efficiency is proposed, considering not only technical characteristics of engineering systems but also user behavioral factors affecting thermal load; approaches to integrating automated heating systems into building energy management infrastructure are improved, contributing to higher energy efficiency at municipal and industrial levels.

Practical significance of the results: the developed approach to automated heating control based on a comprehensive thermal comfort parameter can be implemented in autonomous electric heating systems of residential, administrative, and industrial buildings, reducing energy costs without loss of microclimate quality; proposed adaptive regulation algorithm ensures stable system operation under variable external and internal factors, relevant for regions with unstable climate conditions or irregular building usage schedules; models and methodologies developed can be used in designing and modernizing building energy management systems and integrated into “smart home” platforms to enhance automation and energy efficiency; results can be applied in educational processes for training specialists in energy, automation, and building technologies, and serve as a basis for further applied research in energy-efficient microclimate control; experimental data and modeling confirm the feasibility of

implementing the proposed solutions in energy-saving practices, applicable for local governments and enterprises to optimize utility costs.

Keywords: control, thermal comfort, modeling, control algorithm, microclimate, system, energy efficiency, computer-integrated technology, automation, heating.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:*

За результатами наукових досліджень опубліковано 8 робіт, з них 7 у фахових виданнях з яких 1 стаття у журналах, включених до наукометричної бази Scopus, 4 тез доповідей на конференціях.

1. G. Pivnyak, G. Gruhler, A. Bublikov, Yu. Papaika, Ye. Voskoboinyk Classification of heating conditions in terms of smart control of indoor heating with the use of uncontrolled electric heaters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022, (4): 078 – 083. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-4/078> ;

2. Перспективи автоматизації процесу керування тепловим комфортом / О.О. Бойко, Є.К. Воскобойник, Ю.І. Чеберячко, А.В. Бубліков. – Дніпро: Збірник наукових праць НГУ. – 2023. – №73. – С. 134-143. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/73.134>;

3. Boyko, O., Voskoboinyk, Y., Cheberiachko, Y., & Slavinskyi, D. (2025). Room model for researching the thermal comfort management process. *Electrical and Information Systems*, (107), 37–44. <https://doi.org/10.32782/EIS/2025-107-6>

4. Voskoboinyk, Y., Boyko, O., Slavinskyi, D., & Cheberiachko, Y. (2025). Research on the possibility of reducing energy consumption by controlling the heating system based on thermal comfort. *Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Series: "Computer Engineering and Automation"*, 3(4(36), 5–12. [https://doi.org/10.32782/2786-9024/v3i4\(36\).331266](https://doi.org/10.32782/2786-9024/v3i4(36).331266)

5. Олег Бойко, Євген Воскобойник, Юрій Чеберячко. Удосконалена модель приміщення для дослідження процесу керування тепловим комфортом. *Науково-виробничий журнал "Електромеханічні і енергозберігаючі системи" № 1/2025(68)*, с. 15-22. <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2025.1.68.2>

6. О. О. Бойко, Є. К. Воскобойник, Є. В. Кошеленко. Дослідження процесу керування тепловим комфортом у багатокімнатному будинку з використанням децентралізованої системи. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), ч. I. 428 с. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.316-325](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.316-325)

7. Voskoboinyk, Ye, Boyko, O. Research on the process of controlling thermal comfort in a room. *Informatics and mathematical methods in simulation*. 2026. Vol. 16, no. 1. P. 74–84. <https://doi.org/10.15276/imms.v16.no1.74>

8. Є.К. Воскобойник. Керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. Одеса : Видавничий дім «Гельветика». 2026. No 6. 280 с. с.22-29. <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-3>

### *Опубліковані праці апробаційного характеру:*

1. Воскобойник Є.К. Система дослідження процесу керування тепловим комфортом. Молодь: наука та інновації: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 22–24

листопада 2023 року: у 2-х т. / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2023. Том 1. 474 с.

2. Бойко О.О., Воскобойник Є.К., Бублік А.В. Децентралізована система дослідження процесу керування тепловим комфортом. Новітні технології сучасного суспільства (НТСС-2024) : V Міжнародна науково-практична конференція (м. Чернігів, 12 грудня 2024 р.) : тези доповідей – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. – 346 с.

3. Бойко О.О., Воскобойник Є.К. ЛМІ системи керування тепловим комфортом з використанням електронагрівача. Science and Information Technologies in the Modern World: Collection of Scientific Papers "International Scientific Unity" with Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. February 26-28, 2025. Athens, Greece. 541 p.

4. Бойко О.О., Воскобойник Є.К., Чеберячко Ю. Релейний модуль системи дослідження процесу керування тепловим комфортом. Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference «Modern Perspectives on Global Scientific Solutions» (March 3-5, 2025. Bergen, Norway). European Open Science Space, 2025. 311 p.

## **ЗМІСТ**

### **ВСТУП**

### **РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ**

1.1 Аналіз процесу керування мікрокліматом у приміщенні

1.2 Аналіз процесу керування опаленням

1.2.1 Процес керування температурою у приміщенні

1.2.2 Процес керування відносною вологістю у приміщенні

1.2.3 Процес керування швидкістю повітря у приміщенні

1.2.4 Процес керування опаленням у приміщенні

1.3 Аналіз напрямків зниження витрат енергетичних ресурсів при опаленні приміщення

1.4 Аналіз процесу керування тепловим комфортом у приміщенні

1.5 Висновки

### **РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ПРИМІЩЕННЯ ЗА ТЕПЛОВИМ КОМФОРТОМ**

2.1 Структура моделі системи опалення приміщення

2.2 Розробка моделі опалення приміщення

2.2.1 Модель нагрівача

2.2.2 Модель приміщення

2.2.3 Модель датчика температури

2.2.4 Модель опалення приміщення

2.3 Розробка моделей збурень за тепловим комфортом

2.3.1 Модель зміни середньої температури випромінювання та відносної вологості у приміщенні

2.4 Модель системи опалення приміщення за тепловим комфортом

2.5 Висновки

### **РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ КОМФОРТОМ**

3.1 Дослідження можливості зниження енерговитрат за рахунок керування системою опалення на підставі теплового комфорту

3.1.1 Розробка моделі системи керування для дослідження можливості зниження енерговитрат

3.1.2 Методика дослідження регулюючої можливості зниження енерговитрат

3.1.3 Дослідження регулюючої можливості зниження енерговитрат

3.2 Розробка системи керування тепловим комфортом

3.3 Дослідження регулюючих можливостей системи керування тепловим комфортом

3.4 Розробка системи керування тепловим комфортом з автоматичним налаштуванням

3.5 Дослідження системи керування тепловим комфортом з автоматичним налаштуванням

3.6 Висновки

## **Розділ 4 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ КОМФОРТОМ**

4.1 Структура системи керування тепловим комфортом

4.2 Комплекс технічних засобів системи керування тепловим комфортом

4.3 Розробка програмного забезпечення системи керування тепловим комфортом

4.3.1 Розробка програмного забезпечення системи керування тепловим комфортом на базі двопозиційного регулятора

4.4 Інтеграція системи керування тепловим комфортом у вже існуючі системи опалення

4.5 Висновки

## **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

**ДОДАТОК А** – Акт впровадження у навчальний процес пакету програмного забезпечення NTU\_DP\_SmartHeaterPMV

## ВСТУП

**Актуальність та обґрунтування вибору теми дослідження** Підвищення ефективності функціонування енергетичної системи України є одним із ключових чинників забезпечення національної безпеки та сталого розвитку держави. Актуальність цього напрямку підтверджується положеннями Енергетичної стратегії України на період до 2035 року, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 року № 605-р. Зазначене стратегічне завдання охоплює широкий спектр міжгалузевих процесів, що потребують комплексного підходу до модернізації енергетичної інфраструктури, зокрема у сфері теплопостачання будівель.

У структурі витрат на комунальні послуги промислових підприємств та муніципальних об'єктів витрати на опалення протягом опалювального сезону (тривалістю близько п'яти місяців) становлять від 50 до 80 % загального обсягу, залежно від рівня енергоефективності будівель. Це зумовлює необхідність впровадження сучасних методів та технічних засобів енергоефективного керування процесами теплопостачання, що дозволить досягти суттєвого зниження енергоспоживання.

Навіть за умови високого рівня енергоефективності будівлі існує потенціал для додаткової оптимізації витрат енергії. Для реалізації такого потенціалу необхідне створення інструментів, здатних формувати індивідуальні сценарії енергоспоживання для окремих користувачів або груп користувачів. Це дозволяє досягти балансу між забезпеченням комфортних умов перебування у приміщенні та мінімізацією енергетичних витрат.

Згідно з даними міжнародних досліджень, близько 40 % світового енергоспоживання та третина загальних викидів парникових газів припадає на будівлі. У зв'язку з цим, актуалізується необхідність гармонізації українських нормативних документів у сфері енергоефективності з міжнародними стандартами. Водночас слід враховувати вимоги щодо забезпечення належної якості мікроклімату у приміщеннях, яка регламентується сучасними нормативами та санітарно-гігієнічними показниками.

Досягнення компромісу між зниженням енергоспоживання та забезпеченням теплового комфорту є складним завданням, що потребує врахування низки факторів: конструктивних особливостей будівлі, характеристик інженерних систем, типу джерел енергії, кліматичних умов регіону, а також індивідуальних вимог користувачів до умов комфортності. Комплексний аналіз взаємозв'язку зазначених чинників є актуальним і потребує подальшого наукового опрацювання.

**Мета і задачі дослідження** Метою дисертаційного дослідження є розробка науково обґрунтованих підходів до енергоефективного керування процесами опалення у приміщеннях будівель шляхом формування компромісного рішення між забезпеченням комфортних умов перебування людини та мінімізацією споживання енергетичних ресурсів.

**Для досягнення поставленої мети виникла необхідність вирішення наступних завдань:**

- Аналіз сучасного стану енергоспоживання у будівлях різного призначення в Україні;
- Визначення ключових факторів, що впливають на ефективність теплопостачання;
- Розробка моделі індивідуалізованого керування енергоспоживанням з урахуванням поведінкових та фізіологічних характеристик користувачів;
- Оцінка потенціалу енергозбереження при впровадженні адаптивних сценаріїв опалення;
- Формування рекомендацій щодо інтеграції запропонованих рішень у систему керування енергоспоживанням будівель.

**Об'єкт дослідження** – процес керування параметрами теплового комфорту у внутрішньому середовищі будівельних приміщень, що забезпечує відповідність мікрокліматичних умов нормативним вимогам та індивідуальним потребам користувачів.

**Предмет дослідження** – виступають методи та засоби автоматизованого керування автономними електричними системами опалення, орієнтовані на

досягнення оптимального теплового комфорту з урахуванням енергоефективності та адаптивності до змін зовнішніх і внутрішніх факторів.

**Методи дослідження.** У процесі виконання дисертаційної роботи застосовано комплекс методів, що забезпечують всебічне дослідження процесу енергоефективного керування опаленням приміщень на основі теплового комфорту: Методи математичної статистики – використано для аналізу динаміки змін температурного режиму в приміщеннях, оцінювання варіативності параметрів мікроклімату, а також для статистичного обґрунтування впливу різних факторів на рівень енергоспоживання. Застосування цих методів дозволило виявити закономірності у поведінці системи опалення та сформувані базу для побудови прогнозних моделей. Аналітичні методи – використано для розробки теоретичних засад керування процесом опалення за принципом підтримки комфортної температури. Зокрема, здійснено формалізацію критеріїв теплового комфорту, побудовано математичні моделі теплового балансу приміщення та визначено оптимальні режими роботи системи опалення. Методи теорії автоматичного керування – застосовано для моделювання системи керування автономним електричним опаленням. Розроблено структурні схеми регулювання температури, проведено аналіз стійкості та динамічних характеристик системи, що дозволило обґрунтувати вибір типу регулятора та алгоритму керування. Метод двопозиційного регулювання – використано як базовий підхід до реалізації процесу керування тепловим комфортом у приміщенні. Двопозиційний регулятор забезпечує просту та ефективну реалізацію керування, адаптовану до умов автономного електричного опалення, з можливістю інтеграції в системи розумного дому.

**Наукові положення, що виносяться на захист:**

– Керування на підставі комплексного параметру теплового комфорту, забезпечує зниження витрат енергії на опалення порівняно з традиційними системами керування.

– Добуток коефіцієнта кроку та модуля відношення між різницею уставки комплексного параметра теплового комфорту і його максимальним значенням, визначає параметри налаштування регулятора, що забезпечує стабільність та

ефективність функціонування системи керування в умовах зміни мікроклімату приміщення.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

1. Уперше запропоновано підхід до автоматизованого керування автономним електричним опаленням, який базується на адаптивному сценарному моделюванні теплового комфорту з урахуванням індивідуальних потреб користувачів та змін зовнішніх кліматичних умов.

2. Розроблено математичну модель взаємозв'язку між параметрами мікроклімату приміщення та рівнем енергоспоживання, що дозволяє формувати компромісні режими опалення з урахуванням нормативних показників теплового комфорту.

3. Обґрунтовано доцільність використання інтелектуальних алгоритмів керування для регулювання температурного режиму в реальному часі з метою зниження енергетичних витрат.

4. Запропоновано принцип оцінювання енергоспоживання багатокімнатних будівель у процесі функціонування системи, який базується на параметрах теплового комфорту.

5. Удосконалено підходи до інтеграції систем автоматизованого опалення у загальну інфраструктуру енергоменеджменту будівель, що сприяє підвищенню рівня енергоефективності на муніципальному та промисловому рівнях.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні положення, теоретичні узагальнення, математичні моделі, алгоритми та практичні рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, є результатом особистої науково-дослідної діяльності здобувача.

Здобувачем самостійно: Проведено аналіз сучасного стану енергоефективного керування системами опалення будівель, зокрема автономного електричного опалення, з урахуванням вимог до теплового комфорту. Розроблено математичну модель комплексного параметра теплового комфорту, яка враховує вплив мікрокліматичних умов, поведінкових факторів користувачів та технічних характеристик системи опалення. Сформовано алгоритм адаптивного керування

опаленням на основі двопозиційного регулятора з оновленням параметрів у кожному циклі роботи, що забезпечує стабільність функціонування системи в умовах змінних зовнішніх впливів. Проведено моделювання та експериментальну перевірку ефективності запропонованих рішень, здійснено порівняльний аналіз з традиційними методами керування за температурою. Підготовлено наукові публікації та доповіді, у яких апробовано результати дослідження на міжнародних та всеукраїнських конференціях.

**Апробація матеріалів дисертації** Основні положення та результати дисертаційного дослідження були представлені, обговорені та отримали позитивну оцінку на міжнародних та всеукраїнських наукових заходах, зокрема: XI Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: наука та інновації» (м. Дніпро, 22–24 листопада 2023 року); 1st International Scientific and Practical Conference «Science and Information Technologies in the Modern World» (м. Афіни, Греція, 26–28 лютого 2025 року); Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference «Modern Perspectives on Global Scientific Solutions» (м. Берген, Норвегія, 3–5 березня 2025 року); V Міжнародна науково-практична конференція «Новітні технології сучасного суспільства (НТСС-2024)» (м. Чернігів, 12 грудня 2024 року).

У межах зазначених конференцій результати дослідження були апробовані у формі доповідей, публікацій у збірниках матеріалів, а також у процесі наукових дискусій, що підтвердило їх актуальність, наукову новизну та практичну значущість.

**Структура та обсяг дисертації** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів і висновків, викладених на 153 сторінці машинописного тексту, ілюстрованого 51 рисунками. Робота містить 20 таблиць, список використаної літератури 64 найменування на 6 сторінках і 1 додатка.

**Практичне/теоретичне значення одержаних результатів** Результати дисертаційного дослідження мають суттєве практичне значення для підвищення енергоефективності будівель та оптимізації процесів теплопостачання, зокрема: Розроблений підхід до автоматизованого керування опаленням на основі комплексного параметра теплового комфорту може бути впроваджений у системи

автономного електричного опалення житлових, адміністративних та промислових будівель, що дозволяє знизити витрати енергії без втрати якості мікроклімату. Запропонований алгоритм адаптивного регулювання забезпечує стабільну роботу системи керування в умовах змінних зовнішніх та внутрішніх факторів, що особливо актуально для регіонів із нестабільними кліматичними умовами або змінним графіком використання приміщень. Моделі та методики, розроблені в межах дослідження, можуть бути використані при проектуванні та модернізації систем енергоменеджменту будівель, а також інтегровані в платформи «розумного дому» для підвищення рівня автоматизації та енергоефективності. Результати дослідження можуть бути застосовані у навчальному процесі при підготовці фахівців у галузі енергетики, автоматизації та будівельних технологій, а також слугувати основою для подальших прикладних досліджень у сфері енергоефективного керування мікрокліматом. Експериментальні дані та моделювання підтверджують доцільність впровадження запропонованих рішень у практику енергозбереження, що може бути використано органами місцевого самоврядування та підприємствами для оптимізації витрат на комунальні послуги.

Результати досліджень впроваджені на кафедрі «Кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем» Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» у рамках дисциплін «Проектування систем автоматизації», «Проектування автоматичних систем керування технологічними комплексами», «Автоматизація технологічних процесів автоматизації» при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка».

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Сприятливі параметри мікроклімату у внутрішньому середовищі будівель забезпечуються за рахунок функціонування інженерних систем, зокрема систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Ефективне керування цими системами є ключовим чинником у забезпеченні теплового комфорту, енергоефективності та відповідності санітарно-гігієнічним нормам.

На сьогодні у вітчизняній науково-технічній літературі представлено значну кількість досліджень, присвячених окремим аспектам моделювання та керування мікрокліматом у будівлях. Зокрема, розглядаються різні підходи до регулювання температури, вологості, швидкості повітряних потоків тощо. Проте, відсутні систематизовані дослідження, які б охоплювали порівняльний аналіз існуючих методів керування, їх переваги та обмеження, а також потенціал комбінованого застосування в інтегрованих системах керування.

У міжнародній науковій практиці, навпаки, спостерігається активний розвиток оглядових досліджень, що обумовлено стрімким прогресом у сфері інтелектуальних обчислювальних технологій, зокрема застосуванням методів штучного інтелекту, машинного навчання, нечіткої логіки та мультикритеріальної оптимізації для керування мікрокліматом у будівлях [1–4]. Такі публікації містять глибокий аналіз сучасних алгоритмів, їх ефективності в різних умовах експлуатації та перспективи інтеграції в системи «розумного дому» та енергоменеджменту.

#### **1.1 Аналіз процесу керування мікрокліматом у приміщенні**

Стан повітряного середовища у житлових приміщеннях багатоквартирних будинків є одним із ключових чинників, що впливають на фізіологічне самопочуття людини, її працездатність та загальний рівень життєвого комфорту. До основних параметрів мікроклімату, які визначають якість внутрішнього середовища, належать: температура повітря, його вологість, швидкість руху, а також температура внутрішніх поверхонь огорожувальних конструкцій.

Формування повітряно-теплового режиму в житлових приміщеннях відбувається під впливом комплексу факторів, серед яких: зовнішні метеорологічні умови, теплофізичні характеристики матеріалів огорожувальних конструкцій, рівень повітрообміну, а також особливості експлуатації приміщення. Зазначені чинники визначають ефективність роботи інженерних систем, зокрема опалення, вентиляції та кондиціювання повітря, що забезпечують підтримку нормативних параметрів мікроклімату.

Як зазначає Губернський Ю.Д., у цивільному будівництві житлові приміщення класифікуються за рівнем комфортності, для кожної категорії яких встановлено відповідні нормативні значення мікрокліматичних параметрів. Відповідно до гігієнічних вимог, поняття теплового комфорту трактується як сукупність метеорологічних умов, що забезпечують оптимальне функціонування терморегуляторних механізмів організму людини. Відхилення від цих умов призводить до виникнення дискомфортного мікроклімату, що негативно позначається на самопочутті та продуктивності.

У межах житлових приміщень виділяється так звана обслуговувана зона – простір висотою до 2 метрів від рівня підлоги, в якому постійно перебувають та переміщуються мешканці. Для цієї зони встановлено два рівні метеорологічних умов: оптимальні, що забезпечують найвищий рівень комфорту, та допустимі, які відповідають мінімально прийнятним санітарно-гігієнічним нормам.

Таблиця 1.1 – Показники допустимих та оптимальних параметрів внутрішнього середовища житлових приміщень у різні періоди року. [5]

Період року	Параметри мікроклімату житлових приміщень					
	Оптимальні			Допустимі		
	$t_{\text{повітря}}, ^\circ\text{C}$	Швидкість руху повітря, м/с, не більше	Відносна вологість повітря, %	$t_{\text{повітря}}, ^\circ\text{C}$	Швидкість руху повітря, м/с, не більше	Відносна вологість повітря, %
Теплий	22-25	0,2	60-30	20-28	0,3	65
Холодний	20-22	0,15	45-30	18-24	0,2	60

Оптимальні мікрокліматичні умови визначаються як поєднання параметрів внутрішнього середовища, що при тривалому впливі на людину забезпечують

стабільний фізіологічний стан організму. Згідно з гігієнічними критеріями, такі умови вважаються комфортними для щонайменше 80% осіб, які перебувають у приміщенні. Допустимі умови, у свою чергу, характеризуються незначним рівнем дискомфорту, що не призводить до порушень стану здоров'я, але може впливати на суб'єктивне самопочуття.

Одним із критичних чинників, що впливають на теплове самопочуття людини, є температура внутрішніх поверхонь огорожувальних конструкцій. Значна різниця між температурою тіла людини та температурою навколишніх поверхонь спричиняє інтенсивне тепловіддавання, що може призвести до швидкого охолодження організму та виникнення відчуття дискомфорту.

На сучасному етапі сформовано нормативну базу, яка регламентує умови перебування людини у житлових приміщеннях протягом тривалого часу. Основні вимоги викладено в таких нормативних документах:

ДБН В.2.6-31:2021 – Теплова ізоляція будівель

ДБН В.2.5-67:2013 – Опалення, вентиляція і кондиціонування

ДСанПіН 2.2.4-171-10 – Гігієнічні вимоги до мікроклімату виробничих приміщень

ISO 7730 – Оцінка теплового комфорту за індексами PMV/PPD

ASHRAE 62.1, 55 – Вентиляція та тепловий комфорт

Одним із ключових показників теплового комфорту є радіаційно-ефективна температура  $t_r$ , яка відображає інтегральний вплив температури повітря та температури поверхонь, що оточують людину. Цей параметр дозволяє більш точно оцінити теплові відчуття людини в умовах закритого простору. Для перевірки відповідності мікрокліматичних умов нормативним вимогам застосовується поєднання температури повітря  $t_B$  та радіаційно-ефективної температури  $t_r$ , що дозволяє здійснити оцінку комфортності середовища у приміщеннях різного функціонального призначення.

Визначення значення  $t_r$  здійснюється за допомогою спеціалізованої номограми (рисунок 1.1), яка враховує геометричні та теплотехнічні характеристики

приміщення, а також параметри теплового випромінювання від внутрішніх поверхонь

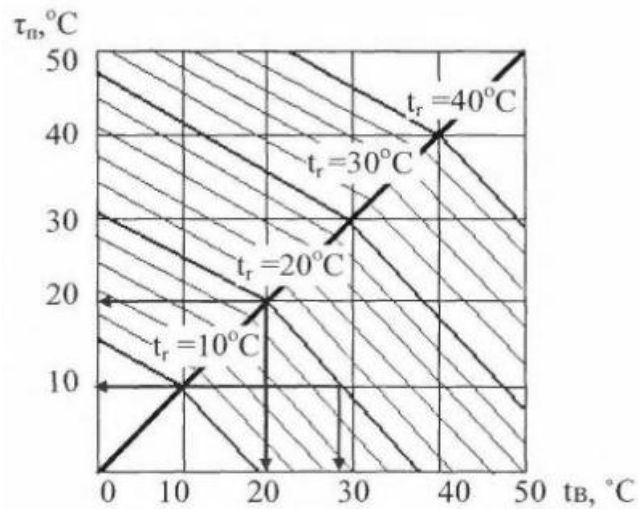


Рисунок 1.1 – Номограма, застосовувана визначення в приміщеннях радіаційно-ефективної температури

Для кожного значення радіаційно-ефективної температури  $t_r$  існує множина комбінацій температури повітря  $t_B$  та температури внутрішніх поверхонь огорожувальних конструкцій, які забезпечують однаковий рівень теплового сприйняття людиною (рис. 1.1). Такий підхід дозволяє враховувати не лише температуру повітря, а й тепловий вплив навколишніх поверхонь, що є критично важливим для оцінки реального мікроклімату приміщення.

Комплексний вплив температури нерухомого повітря та відносної вологості на теплове самопочуття людини визначається через показник ефективної температури. Цей інтегральний параметр відображає суб'єктивне сприйняття тепла або холоду, що виникає внаслідок взаємодії терморегуляторних механізмів організму з навколишнім середовищем [6].

Між суб'єктивним відчуттям тепла людиною та ефективною температурною шкалою існує чіткий кореляційний зв'язок, який дозволяє кількісно оцінити рівень комфорту. Такий зв'язок представлено у таблиці 1.2, де наведено відповідність між значеннями ефективної температури та характером теплових відчуттів (наприклад, «холодно», «прохолодно», «комфортно», «спекотно» тощо).

Таблиця 1.2 – Залежність відчуттів тіла людини від ефективної температури

Ефективна температура, °С						
40-42	35	30	25	20	15	10
Відчуття людини						
Дуже спекотно	Спекотно	Тепло	Комфортно	Прохолодно	Холодно	Дуже холодно

Одним із ключових завдань інженерних систем багатоквартирних житлових будинків є забезпечення нормативного рівня теплового та вологісного комфорту у внутрішньому середовищі приміщень. Ці системи відіграють вирішальну роль у підтриманні регламентованих параметрів мікроклімату, зокрема температури, вологості, швидкості руху повітря та його санітарно-гігієнічної якості. Забезпечення екологічної безпеки повітряного середовища також є важливою складовою функціонування інженерних систем.

Враховуючи індивідуальні особливості терморегуляції та сприйняття мікроклімату кожною людиною, слід зазначити, що навіть оптимальні умови, які задовольняють більшість мешканців (понад 90%), можуть виявитися дискомфортними для 5–10% осіб [7-8].

Результати досліджень Fang (1996), Berglund та Cain (1989) [9-10] свідчать про те, що суб'єктивна якість повітря у житлових приміщеннях сприймається як вища за умови знижених значень температури та вологості (Low Environmental Values – LEV). Більшість науковців, які досліджують питання теплового комфорту, дійшли висновку, що для забезпечення сприятливих умов перебування температура повітря у закритих приміщеннях має підтримуватись поблизу нижньої межі діапазону теплової нейтральності, а відносна вологість – на низькому рівні, що сприяє покращенню самопочуття та зниженню ризику розвитку мікробіологічних процесів.

Низька швидкість руху повітря або її повна відсутність є ознакою незадовільної вентиляції, що призводить до появи відчуття задухи, зниження концентрації уваги та легкої пригніченості. Натомість надмірна рухливість повітря спричиняє інтенсивне охолодження тіла через підвищення теплових втрат шляхом конвекції та випаровування, що також може викликати дискомфорт.

У зв'язку з цим, шкала ефективної температури була доповнена параметром швидкості руху повітря, що дозволило сформуванню нового інтегрального показника – еквівалентно-ефективну температуру (ЕЕТ). Цей показник більш точно відображає теплове сприйняття людиною умов у приміщенні, враховуючи одночасно температуру, вологість та рухливість повітря.

На рисунку 1.2 представлено номограму для визначення ЕЕТ, яка дозволяє здійснити оцінку мікрокліматичних умов у житлових приміщеннях з урахуванням комплексного впливу основних параметрів повітряного середовища [11].

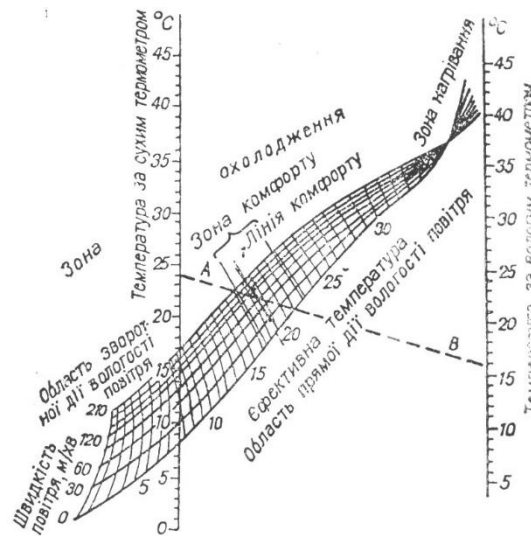


Рисунок 1.2 – Номограма еквівалентно-ефективних температур

На рисунку 1.2 представлено дві зони теплового комфорту – літню та зимову, які відображають діапазони значень еквівалентно-ефективної температури (ЕЕТ), що забезпечують сприятливі умови для перебування людини у приміщенні. Зазначені температурні межі відповідають фізіологічно прийнятним умовам, що сприяють збереженню гарного самопочуття в різних сезонних ситуаціях.

Аналіз номограми дозволяє зробити важливий висновок: при зниженні температури повітря нижче  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , вплив відносної вологості на теплове сприйняття змінюється на протилежний. Зокрема, при низькій температурі та високій вологості у приміщенні виникає відчуття холоду, що зумовлює дискомфортний стан. Це пояснюється зниженням ефективності терморегуляції організму через зменшення тепловіддачі шляхом випаровування.

У протилежному випадку, коли температура повітря перевищує 35 °С, організм людини не здатен ефективно відводити тепло, що призводить до накопичення теплоти. Особливо це проявляється при підвищеній швидкості руху повітря, яка, замість охолодження, сприяє посиленому тепловому навантаженню. Така зміна характеру теплового сприйняття чітко простежується у відповідній частині номограми.

Слід зазначити, що при первинному визначенні ЕЕТ враховувалися лише три параметри повітряного середовища: температура, вологість та швидкість руху повітря. Температура навколишніх поверхонь не включалась до розрахунку, що обмежувало точність оцінки теплового стану.

У результаті багаторічних досліджень, D. Bedford запропонував новий показник – еквівалентний тепловий стан організму, який дозволяє більш точно визначити комфортний стан людини в умовах закритого приміщення. Він також розробив регресійне рівняння, що описує суб'єктивне відчуття тепла як функцію чотирьох основних характеристик мікроклімату:

$$ET=f(t_B, RH, v, t_s) \quad (1)$$

де:  $t_B$  – температура повітря, °С

$RH$  – відносна вологість, %

$v$  – швидкість руху повітря, м/с

$t_s$  – температура навколишніх поверхонь, °С

Це рівняння дозволяє здійснити кількісну оцінку теплового комфорту, враховуючи комплексний вплив усіх ключових параметрів мікроклімату.

Відхилення температури повітря у приміщенні від комфортного діапазону на  $\pm 2...3$  °С є індикатором ступеня дискомфорту мікрокліматичних умов. Такі відхилення можуть спричинити порушення теплового балансу організму, що негативно впливає на самопочуття та працездатність людини.

Згідно з методикою, розробленою Інститутом будівельних служб (CIBSE), комфортність перебування людини в приміщенні визначається комплексом факторів, які умовно поділяються на три основні групи:

1. Фактори, пов'язані з теплоізоляцією одягу:

$f_{од}$  – ступінь покриття тіла одягом;

$I_{clo}$  – теплоізоляційні властивості одягу, виражені в одиницях «clo» (1 clo  $\approx$  теплоізоляція типового костюма).

2. Фактори, пов'язані з фізіологічною активністю:

$M/F_t$  – рівень метаболічної активності, Вт/м<sup>2</sup>;

$v$  – швидкість руху повітря, м/с;

механічна діяльність – тип і інтенсивність рухів, що впливають на тепловіддачу.

3. Фактори, що характеризують параметри мікроклімату:

$t_r$  – середня радіаційна температура навколишніх поверхонь, °С;

температура повітря, вологість, швидкість його руху – як основні метеорологічні характеристики.

На основі цих параметрів Оле Фангер (O. Fanger) розробив індекс очікуваного теплового відчуття – PMV (Predicted Mean Vote), який дозволяє кількісно оцінити суб'єктивне сприйняття мікроклімату людиною. PMV враховує баланс між виробленням тепла організмом та його відведенням у навколишнє середовище.

Шкала PMV представлена в таблиці 1.3:

Таблиця 1.3 – Рангові оцінки відчуття людиною тепла

Відчуття тепла людиною	Оцінка
Холодно	-3
Прохолодно	-2
Трохи прохолодно	-1
Комфортно	0
Трохи тепло	1
Тепло	2
Спекотно	3

Ця шкала широко використовується в стандартах ISO 7730 та ASHRAE 55 для оцінки теплового комфорту в приміщеннях різного призначення.

На рисунку 1.3 представлено номограми метеорологічних умов, розроблені О. Фангером, які дозволяють здійснити оцінку теплового комфорту в обслуговуваній зоні приміщення з урахуванням термічного опору одягу

$R_{од}$ , вираженого в одиницях clo. Ці графічні залежності є інструментом для визначення очікуваного теплового стану людини (PMV) за різних комбінацій мікрокліматичних параметрів.

Номограми враховують такі змінні:

температуру повітря  $t_B$ , °C;

відносну вологість  $RH$ , %;

швидкість руху повітря  $v$ , м/с;

середню радіаційну температуру  $t_r$ , °C;

термічний опір одягу  $R_{од}$ , clo;

рівень метаболічної активності  $M$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Завдяки цим номограмам можливо: визначити зону теплового комфорту для конкретного типу одягу; оцінити відхилення від нейтрального теплового стану; адаптувати параметри інженерних систем (опалення, вентиляції, кондиціонування) до реальних умов експлуатації.

Таким чином, номограми Фангера є важливим інструментом у проектуванні та оцінці мікроклімату житлових приміщень, дозволяючи враховувати індивідуальні особливості людини та змінні зовнішнього середовища.

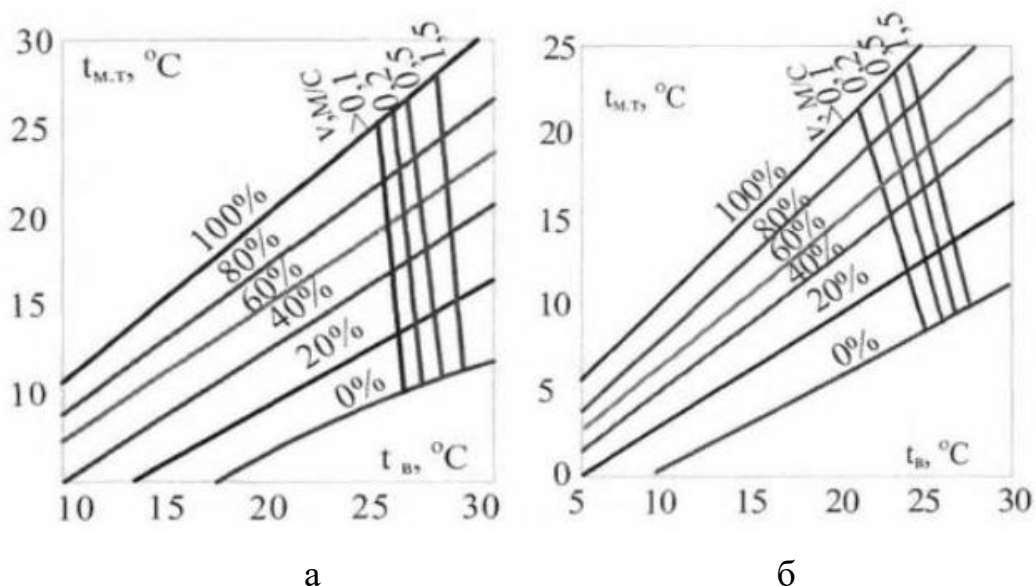


Рисунок 1.3 – Діаграма комфорту за даними О. Фангера

а) Родягу = 0/5 clo б) Родягу = 1 clo

Згідно з представленими номограмами О. Фангера (рисунок 1.3), для оцінки теплового комфорту в обслуговуваній зоні приміщення необхідно враховувати термічний опір одягу  $R_{\text{одягу}}$ , який є одним із ключових параметрів при розрахунку індексу PMV.

Величина термічного опору одягу залежить від ступеня утеплення людини: Для осіб, які легко одягнені (наприклад, у літньому одязі), термічний опір становить приблизно

$$R_{\text{одягу}}=0,5 \text{ clo}$$

Для осіб, які одягнені нормально (типовий повсякденний одяг),

$$R_{\text{одягу}}=1,0 \text{ clo}$$

Одиниця clo є стандартизованим показником теплоізоляції одягу, де

$$1 \text{ clo}=0,155 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$$

Це означає, що одяг із термічним опором 1 clo забезпечує теплоізоляцію, яка дозволяє людині перебувати в умовах температури близько 21 °C у стані теплового комфорту при помірній активності.

Врахування параметра  $R_{\text{одягу}}$  у номограмах дозволяє адаптувати мікрокліматичні умови до різних сезонів, типів діяльності та індивідуальних особливостей мешканців, що є критично важливим для точного прогнозування теплового самопочуття.

## 1.2 Аналіз процесу керування опаленням

Опалення є невід'ємною складовою інженерного забезпечення будівель, що виконує функцію підтримання комфортного теплового стану внутрішнього середовища шляхом компенсації тепловтрат у холодний період року. Ефективне функціонування системи опалення забезпечує стабільність мікрокліматичних параметрів, необхідних для нормального життєдіяльності людини.

Процес керування опаленням охоплює комплекс технічних, енергетичних та інформаційних заходів, спрямованих на регулювання температури повітря та температури внутрішніх поверхонь огорожувальних конструкцій у межах заданих

нормативних значень. Такий підхід дозволяє забезпечити не лише комфорт, але й енергоефективність будівлі.

У сучасних умовах системи опалення дедалі частіше інтегруються з інтелектуальними системами керування будівлею (BMS – Building Management Systems). Ці системи забезпечують автоматизоване регулювання теплового режиму з урахуванням змін зовнішніх кліматичних умов, внутрішніх теплових навантажень, присутності людей, рівня сонячної інсоляції тощо. Така інтеграція сприяє оптимізації енергоспоживання та підвищенню загальної ефективності експлуатації будівлі.

Основні цілі керування системою опалення: Забезпечення теплового комфорту відповідно до нормативних вимог (ДБН, ISO, ASHRAE); Мінімізація енергоспоживання за рахунок адаптивного регулювання; Адаптація до змін зовнішніх та внутрішніх умов, включаючи погодні фактори, кількість мешканців, тепловиділення від обладнання; Підвищення надійності та довговічності обладнання шляхом оптимального режиму роботи; Гнучкість системи з можливістю індивідуального налаштування під потреби користувача.

### 1.2.1 Процес керування відносною вологістю у приміщенні

Відносна вологість повітря є одним із фундаментальних параметрів мікроклімату, що істотно впливає на терморегуляцію організму людини, її самопочуття, рівень комфорту, працездатність, а також на збереження матеріалів, обладнання та стабільність технологічних процесів у виробничих і побутових умовах. Згідно з нормативними джерелами [5, 12], оптимальний діапазон відносної вологості для забезпечення комфортного середовища становить 40–60 %, тоді як допустимі межі можуть варіюватися в межах 30–70 %, залежно від функціонального призначення приміщення.

З фізико-технічної точки зору, відносна вологість ( $\varphi$ ) визначається як відношення парціального тиску водяної пари в повітрі ( $p_v$ ) до тиску насиченої водяної пари ( $p_s(t)$ ), що відповідає поточній температурі  $t$ :

$$\varphi = \frac{p_v}{p_s(t)} \cdot 100\% \quad (2)$$

Цей показник є критичним для оцінки гігієнічних, технологічних та енергетичних умов у замкнених просторах, а також для розробки систем автоматизованого контролю мікроклімату в будівлях різного призначення.

Процес автоматизованого керування вологістю вимагає:

- вимірювання фактичної вологості повітря (датчики вологості, наприклад, емнісного або психрометричного типу);
- активного зволоження або осушення повітря;
- наявності системи керування (контролер, алгоритм регулювання, виконавчі механізми).

Математична модель динаміки зміни вологості у замкненому приміщенні може бути подана у вигляді рівняння масового балансу водяної пари:

$$\frac{dW(t)}{dt} = G_{\text{вх}}(t) - G_{\text{вих}}(t) + G_{\text{внут}}(t) \quad (3)$$

де:  $W(t)$  – кількість водяної пари у приміщенні, г,  $G_{\text{вх}}(t)$  – надходження вологи з припливним повітрям, г/с,  $G_{\text{вих}}(t)$  – винесення вологи з витяжним повітрям, г/с,  $G_{\text{внут}}(t)$  – внутрішні джерела вологи (люди, технології, випаровування), г/с.

Ці масові потоки залежать від витрати повітря ( $Q$ ) та абсолютної вологості ( $x$ ):

$$G = Q \cdot x = 0.622 \cdot \frac{p_v}{p_{\text{atm}} - p_v} \quad (4)$$

У результаті отримаємо передавальну функцію між потоком зволожувача (або осушувача) і зміною відносної вологості. Якщо зволожувач подає масову витрату вологи  $G_3(t)$ , модель динаміки може бути представлена у вигляді:

$$\frac{\delta \varphi(t)}{\delta t} = \frac{1}{V} \cdot \left( \frac{d\varphi}{dW} \cdot G_3(t) - \frac{\varphi(t)}{\tau} \right) \quad (5)$$

де:  $V$  – об'єм приміщення,  $\tau$  – стала часу вентиляції,  $\tau = V/Q$ .

У спрощеному вигляді для автоматичного регулювання вологості застосовуються моделі першого порядку:

$$G(s) = \frac{K}{\tau_s + 1} \quad (6)$$

де  $K$  – коефіцієнт підсилення, що враховує ефективність зволожувача (г/с на % керування), а  $\tau$  – інерційність процесу.

Для стабілізації відносної вологості використовується замкнена система регулювання з пропорційно-інтегральним (ПІ) регулятором:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt \quad (7)$$

де  $e(t) = \varphi_{\text{зад}}(t) - \varphi(t)$  – відхилення поточної вологості від заданого значення.

Висока інерційність об'єкта, наявність зовнішніх та внутрішніх збурень (зокрема, відкриття вікон, зміна кількості присутніх осіб), а також нелінійна залежність між температурою повітря та насиченою вологістю обумовлюють необхідність застосування адаптивних або нечітких регуляторів. Такі регулятори забезпечують ефективне підтримання параметрів мікроклімату в умовах змінного середовища, зокрема в реальному часі [13-15].

У системах типу HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) автоматизоване регулювання вологості, як правило, реалізується в рамках інтегрованої системи керування мікрокліматом, яка одночасно враховує температуру, концентрацію вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ), присутність людей, рівень освітлення та інші параметри. Застосування прогнозного керування (Model Predictive Control, MPC) на основі оптимізаційних моделей дозволяє враховувати очікувані зміни вологості, спричинені зовнішніми впливами, що істотно підвищує точність та адаптивність системи [16].

До ключових особливостей процесу керування вологістю належать:

при зниженні температури повітря відносна вологість зростає, навіть за незмінної абсолютної вологості, що створює ризик утворення конденсату на поверхнях;

осушення повітря зазвичай реалізується шляхом його охолодження нижче точки роси з подальшим підігрівом до комфортної температури;

зволоження повітря потребує суворого контролю санітарних норм, зокрема чистоти води та повітря, з метою запобігання розвитку мікроорганізмів у зволожувальному обладнанні [17].

Таким чином, автоматизоване керування вологістю в замкнених просторах є складним багатofакторним завданням, що потребує:

розробки аналітичних і чисельних моделей динаміки вологості;

застосування сучасних сенсорних технологій для точного вимірювання параметрів повітря;

використання інтелектуальних алгоритмів керування, здатних адаптуватися до змінних умов;

інтеграції в комплексні системи керування будівлями (Building Management Systems, BMS) для забезпечення енергоефективності, комфорту та безпеки.

### **1.2.2 Процес керування швидкістю повітря у приміщенні**

Швидкість повітряного потоку є одним із ключових параметрів мікроклімату, що безпосередньо впливає на тепловий комфорт людини, ефективність вентиляції, а також на енергоспоживання систем життєзабезпечення приміщення. Згідно з нормативними документами [5, 18], допустимі значення швидкості повітря в зоні постійного перебування людей не повинні перевищувати:

0,3 м/с – у холодний період року;

0,5 м/с – у теплий період.

Перевищення зазначених порогових значень може спричинити виникнення протягів, дискомфорт, а також зниження продуктивності праці. Водночас надмірно низька швидкість повітряного потоку призводить до погіршення повітрообміну, накопичення шкідливих речовин та зниження якості повітря.

Процес автоматизованого керування швидкістю повітря реалізується шляхом регулювання витрати повітря у вентиляційних каналах за допомогою таких виконавчих пристроїв, як: регулювальні клапани, дросельні заслінки, частотно-керовані вентилятори.

Ці пристрої дозволяють змінювати об'ємну витрату повітря відповідно до поточних потреб, забезпечуючи адаптивне керування мікрокліматом у реальному часі.

Для опису фізичного процесу в умовах усталеного ламінарного потоку повітря в каналі можна використати спрощене рівняння, що базується на рівнянні Бернуллі та рівнянні неперервності:

$$Q=A \cdot v \tag{8}$$

де:  $Q$  – об’ємна витрата повітря ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $A$  – площа поперечного перерізу вентиляційного каналу ( $\text{м}^2$ );  $v$  – середня швидкість повітряного потоку ( $\text{м}/\text{с}$ ).

Це рівняння дозволяє оцінити зміну швидкості потоку при зміні геометричних параметрів каналу або витрати повітря, що є основою для розробки алгоритмів керування в системах HVAC.

Якщо розглядати витрату  $Q(t)$  як функцію сигналу керування  $u(t)$ , наприклад, частоти обертання вентилятора, то модель об’єкта набуває вигляду:

$$v(t) = \frac{f(u(t))}{A} \quad (9)$$

У системах із частотним регулюванням вентилятора витрата повітря прямо пропорційна його кутовій швидкості обертання  $\omega(t)$ , яка лінійно залежить від частоти інвертора  $f(t)$ , згідно з [27]:

$$Q(t) \propto \omega(t) \propto f(t) \rightarrow v(t) \propto \frac{f(t)}{A} \quad (10)$$

Для реалізації ефективного керування швидкістю повітряного потоку в системах вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC) застосовується класична структура замкненої системи автоматичного регулювання, яка забезпечує стабільність, точність та адаптивність процесу в умовах змінного навантаження.

Структура такої системи включає наступні функціональні компоненти:

Датчик швидкості повітря – призначений для безперервного вимірювання поточного значення швидкості потоку. Залежно від вимог до точності та умов експлуатації можуть використовуватись: анемометри (механічні або ультразвукові); термоанемометри (на основі зміни тепловіддачі при обдуві нагрівального елемента).

Контролер – виконує функцію обробки сигналу від датчика та формування керуючого впливу. Залежно від складності об’єкта керування та характеру збурень можуть застосовуватись: пропорційно-інтегральні (ПІ) регулятори; нечіткі логічні регулятори (Fuzzy Logic Controllers); адаптивні регулятори, здатні змінювати параметри керування в реальному часі.

Виконавчий механізм – реалізує фізичну зміну витрати повітря шляхом регулювання роботи вентилятора або положення заслінки. Найпоширенішими є:

частотні перетворювачі, що змінюють швидкість обертання вентилятора серводвигуни, які керують положенням дросельних заслінок у повітропроводах.

Об'єкт керування – система повітропроводів із вентилятором, яка формує повітряний потік у приміщенні. Динаміка об'єкта описується рівняннями гідродинаміки, що враховують опір повітряного тракту, інерційність потоку та змінність навантаження.

Для простого моделювання динаміки об'єкта використовується лінійна передавальна функція:

$$G(s) = \frac{K}{\tau_s + 1} \quad (11)$$

де:  $K$  – коефіцієнт підсилення системи (характеризує зміну швидкості на одиницю керуючого впливу),  $\tau$  – стала часу вентиляційної системи, що враховує інерційність потоку та механіки.

Синтез регулятора виконується з урахуванням вимог до швидкодії та стійкості системи. У типовому випадку ПІ-регулятор задається як:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt \quad (12)$$

де:  $e(t) = v_{\text{зад}} - v(t)$  – похибка регулювання,  $K_p$ ,  $K_i$  – коефіцієнти регулятора, які підбираються емпірично або методами частотного аналізу.

У більш складних випадках використовується ідентифікація динамічних моделей на основі експериментальних даних, а також застосування числових методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) для просторово-часового моделювання розподілу швидкостей у приміщенні [20].

У сучасних системах автоматизації мікроклімату реалізуються не лише класичні алгоритми регулювання, але й адаптивні, погодозалежні та контекстно-чутливі стратегії, що враховують зміну зовнішніх кліматичних умов, присутність людей у приміщенні, рівень забруднення повітря, а також інші динамічні фактори. Такий підхід дозволяє забезпечити гнучке та ефективне керування повітрообміном, орієнтоване на досягнення оптимальних умов комфорту при мінімізації енерговитрат.

Інтеграція інтелектуальних систем керування будівлями (Building Management Systems, BMS) забезпечує централізоване керування вентиляційними процесами, з можливістю використання зворотного зв'язку, прогнозних моделей та оптимізаційних алгоритмів. Зокрема, застосування методів Model Predictive Control (MPC) дозволяє враховувати майбутні зміни параметрів середовища та адаптувати керуючі дії відповідно до очікуваних сценаріїв [21].

Таким чином, процес автоматизованого керування швидкістю повітряного потоку у приміщеннях базується на фундаментальних фізичних принципах (закон збереження маси, рівняння неперервності, гідродинамічні моделі), з урахуванням технологічних обмежень (характеристики обладнання, конфігурація повітропроводів) та енергетичних критеріїв (ефективність, споживання, втрати). Така система є невід'ємною складовою сучасних BMS-рішень, спрямованих на підвищення комфорту, безпеки та енергоефективності експлуатації будівель.

### **1.2.3 Процес керування опаленням у приміщенні**

Однією з пріоритетних функціональних задач автоматизованих систем керування параметрами мікроклімату в будівлях є забезпечення теплового комфорту у внутрішньому середовищі приміщень. Визначальним параметром, що характеризує тепловий стан повітряного середовища, є температура внутрішнього повітря, яка повинна підтримуватися в межах нормативних значень відповідно до чинних регламентів.

Згідно з положеннями Державних будівельних норм України ДБН В.2.5-67:2013 та міжнародного стандарту ISO 7730:2005, оптимальні температурні умови для житлових і громадських приміщень за стандартних умов експлуатації мають перебувати в діапазоні від 20 °С до 24 °С. Відхилення від зазначених меж може призводити до зниження рівня комфорту, продуктивності та загального добробуту користувачів приміщення.

Процес терморегуляції в системах опалення передбачає стабілізацію температури внутрішнього повітря  $T_{in}$  на заданому рівні  $T_{зад}$ , з урахуванням впливу зовнішніх (температура зовнішнього повітря, сонячна радіація тощо) та внутрішніх

(тепловиділення від обладнання, присутність людей) збурень. Для реалізації зазначеної функції застосовуються автоматизовані системи регулювання, що базуються на математичних моделях теплових процесів, побудованих із використанням принципів теплотехніки та фізики переносу енергії.

Аналітична модель процесу передачі тепла між середовищем і приміщенням описується рівнянням теплового балансу:

$$C_p \cdot \frac{dT_{in}(t)}{dt} = Q_{вх}(t) - Q_{втр}(t) + Q_{вн}(t) \quad (13)$$

де  $C_p$  – тепловий коефіцієнт повітря у приміщенні;  $Q_{вх}(t)$  – теплова енергія, що надходить від системи опалення;  $Q_{втр}(t)$  – тепловтрати через огорожувальні конструкції та вентиляцію;  $Q_{вн}(t)$  – внутрішні тепловиділення (люди, обладнання тощо).

Тепловтрати оцінюються за формулою:

$$Q_{втр}(t) = K_{буд} \cdot (T_{in}(t) - T_{зов}(t)) \quad (14)$$

де  $K_{буд}$  – теплопровідність огорожувальних конструкцій;  $T_{зов}(t)$  – температура зовнішнього повітря.

З позиції теорії автоматичного керування, функціонування системи опалення доцільно розглядати як задачу регулювання в замкненій системі зворотного зв'язку. Такий підхід дозволяє формалізувати процес підтримання температурного режиму в приміщенні як динамічну систему, що реагує на змінні зовнішні та внутрішні впливи.

Типова структурна схема системи включає такі основні компоненти:

Об'єкт регулювання – температурне поле внутрішнього середовища приміщення, яке змінюється під впливом теплових надходжень та втрат;

Вимірювальні елементи (датчики) – пристрої для моніторингу температури внутрішнього повітря  $T_{in}$  та зовнішнього повітря  $T_{out}$ , що забезпечують актуальні дані для формування керуючого сигналу;

Регулятор – цифровий або аналоговий пристрій, який реалізує алгоритм керування на основі заданого закону регулювання. Найпоширенішим варіантом є

пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор, що формує керуючий вплив  $u(t)$  за наступним виразом:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt \quad (15)$$

де  $e(t) = T_{\text{зад}} - T_{\text{in}}(t)$  – сигнал похибки,  $u(t)$  – керуючий сигнал (наприклад, положення клапана або швидкість циркуляційного насоса),  $K_p$ ,  $K_i$  – коефіцієнти регулятора.

Застосування замкненої структури зворотного зв'язку забезпечує адаптивність системи до змінних умов експлуатації, зокрема до коливань зовнішньої температури, теплових навантажень та інерційності об'єкта регулювання. Такий підхід дозволяє досягти стабільного температурного режиму з мінімальними енергетичними витратами та високим рівнем теплового комфорту.

Для складних об'єктів з інерцією або часовими затримками використовуються моделі передавальної функції об'єкта:

$$G(s) = \frac{K}{\tau_s + 1} \cdot e^{-T_3 s} \quad (16)$$

де  $\tau$  – стала часу,  $T_3$  – часова затримка,  $K$  – коефіцієнт підсилення.

У контексті підвищення ефективності автоматизованих систем керування мікрокліматом, особливу увагу привертають сучасні методи регулювання, що базуються на інтелектуальних та адаптивних алгоритмах. До таких методів належать:

Адаптивне регулювання, що забезпечує автоматичне налаштування параметрів керування відповідно до змінних характеристик об'єкта та зовнішніх умов;

Модельно-предиктивне керування (Model Predictive Control, MPC), яке використовує математичну модель об'єкта для прогнозування його поведінки та оптимізації керуючих дій у реальному часі;

Методи нечіткої логіки, що дозволяють враховувати невизначеність і лінгвістичні правила при формуванні керуючих сигналів;

Алгоритми штучного інтелекту, зокрема нейронні мережі та машинне навчання, які здатні самостійно виявляти закономірності в даних та адаптуватися до нових сценаріїв експлуатації.

Застосування зазначених підходів сприяє: зменшенню амплітуди температурних коливань у приміщенні; покращенню динамічних характеристик системи (швидкодії, стійкості, точності); оптимізації енергоспоживання за рахунок більш точного прогнозування теплових навантажень та адаптації до змінних умов.

Таким чином, аналітичне обґрунтування процесів керування тепловим режимом є фундаментальною основою для розробки високоефективних автоматизованих систем, здатних забезпечити нормативний рівень теплового комфорту при мінімальних витратах енергетичних ресурсів. Це, у свою чергу, відповідає сучасним вимогам сталого розвитку та енергоефективності в будівельній галузі.

### **1.3 Аналіз напрямків зниження витрат енергетичних ресурсів при опаленні приміщення**

У системах опалення будівель енергетичні витрати становлять суттєву частину загального споживання енергоресурсів. У зв'язку з постійним зростанням вартості енергоносіїв та глобальними кліматичними викликами, актуальним завданням є розробка і впровадження методів та технічних засобів, що дозволяють знизити споживання енергії при збереженні комфортного мікроклімату в приміщеннях. Автоматизація систем опалення є одним з ключових напрямків у вирішенні цього завдання.

До основних втрат теплової енергії у приміщеннях відносяться [22]:

- Через огорожувальні конструкції (стіни, покрівля, вікна, підлога) – до 30–50% втрат;
- Інфільтрація/вентиляція повітря – 20–40%;
- Неоптимальне керування системами опалення – 15–25%;
- Внутрішні теплові надлишки без утилізації – до 10%.

Загальні втрати можна описати рівнянням теплового балансу:

$$Q_{\text{втр}} = \sum_{i=1}^n K_i \cdot S_i \cdot (T_{\text{вн}} - T_{\text{зов}}) \quad (17)$$

де:  $K_i$  – коефіцієнт теплопередачі  $i$ -го елемента оболонки будівлі,

- $S_i$  – площа відповідного елемента,
- $T_{\text{вн}}, T_{\text{зов}}$  – температура внутрішнього та зовнішнього повітря відповідно.

Покращення теплоізоляційних характеристик будівель – базовий напрямок зменшення втрат: утеплення стін, покрівлі та підлоги (зменшення  $K_i$ ); встановлення енергоефективних вікон (склопакетів з низькоемісійним покриттям); усунення містків холоду. Ці заходи дозволяють знизити теплові втрати до 40–60% [23-24].

Використання зовнішнього температурного збурення як вхідного сигналу дозволяє динамічно змінювати теплове навантаження. У такому випадку закон регулювання для системи опалення набуває вигляду:

$$T_{\text{зад}} = a \cdot T_{\text{зов}} + b \quad (18)$$

де  $a, b$  – параметри погодозалежної кривої. Це дозволяє уникати перегрівів приміщень при підвищенні зовнішньої температури і відповідно знижувати енергоспоживання до 15–25% [25].

У сучасних будівлях використовується вентиляція з рекуператорами тепла, яка дозволяє повертати до 70–90% тепла витяжного повітря. Це істотно зменшує навантаження на систему опалення [26].

Системи типу Model Predictive Control (MPC) дозволяють передбачати зміну температури, враховувати інерційність будівельних конструкцій та змінювати подачу тепла на основі прогнозу. Це знижує витрати на 10–15% у порівнянні зі звичайними ПІД-регуляторами [27].

Аналітична модель для MPC:

$$\min_{u(0), \dots, u(N)} \sum_{k=1}^N (T_{\text{вн}}(k) - T_{\text{зад}}(k))^2 + \lambda \cdot \sum_{k=1}^N u^2(k) \quad (19)$$

під обмеженням:

$$T_{\text{вн}}(k+1) = A \cdot T_{\text{вн}}(k) + B \cdot u(k) + E \cdot T_{\text{зов}}(k) \quad (20)$$

де  $u(k)$  – керуюча дія (теплоподача),  $\lambda$  – коефіцієнт ваги витрат енергії.

Застосування незалежного керування температурою у різних зонах (кімнатах) з урахуванням графіка використання приміщення дозволяє суттєво зменшити

теплове навантаження. Термостатичні головки з електроприводом, керовані по таймеру чи сенсорами присутності, забезпечують енергозбереження до 20% [28].

Зниження витрат енергетичних ресурсів у системах опалення приміщень можливе лише при комплексному підході, що поєднує підвищення теплозахисту, впровадження інтелектуального регулювання та використання сучасних автоматизованих систем. Автоматизація стає ключовим елементом в досягненні енергоефективності без шкоди для комфорту.

#### 1.4 Аналіз процесу керування тепловим комфортом у приміщенні

Згідно з класифікаційною схемою моделей керування мікрокліматом у будівлях (рис. 1.4), усі моделі поділяються на три основні класи відповідно до ступеня доступності та деталізації внутрішньої структури об'єкта моделювання: моделі білого ящика, моделі чорного ящика та моделі сірого ящика [29]. Такий поділ дозволяє систематизувати підходи до побудови математичних моделей залежно від наявності фізико-технічної інформації про процеси, що відбуваються в системі, та рівня абстрагування при їх описі.

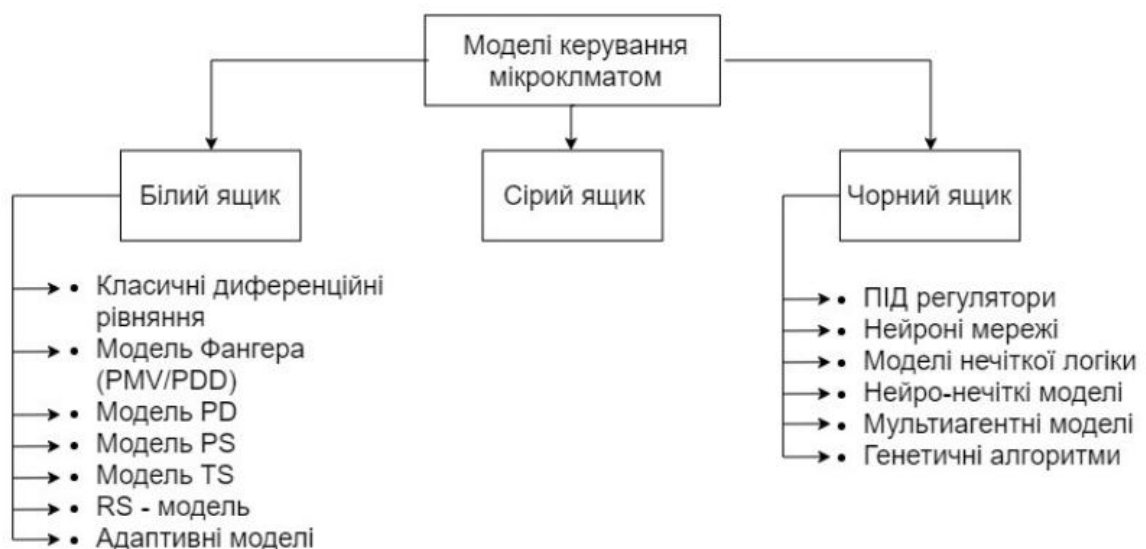


Рисунок 1.4 – Класифікація моделей керування мікрокліматом

Моделі білого ящика характеризуються повною прозорістю структури: відомі всі вхідні та вихідні дані, зовнішні та внутрішні параметри системи. Вони базуються на складних системах диференціальних рівнянь, що враховують:

геометричні характеристики будівлі;  
теплотехнічні властивості огорожувальних конструкцій;  
фізичні процеси тепло- та масообміну.

Усі параметри таких моделей або вимірюються експериментально, або обчислюються аналітично. Незважаючи на високу точність, ці моделі є обчислювально громіздкими та потребують значних ресурсів і часу для реалізації.

До підкласів моделей білого ящика належать:

моделі комфортності, що враховують чутливість людини до мікрокліматичних умов на основі індексів PMV (Predicted Mean Vote) та PDD (Predicted Percentage of Dissatisfied);

моделі електротеплової аналогії, побудовані на математичній тотожності рівнянь електропровідності та теплопровідності [30].

Моделі чорного ящика не використовують фізичні принципи в явному вигляді. Вони оперують лише вхідними та вихідними параметрами, не розкриваючи внутрішню структуру процесів. Такі моделі є апроксимацією спостережуваних даних і зазвичай реалізуються на основі:

штучних нейронних мереж;  
методів нечіткої логіки [31-32].

Їх перевагою є гнучкість та здатність адаптуватися до складних, нелінійних залежностей, однак точність може залежати від якості навчальних даних.

Моделі сірого ящика є гібридними – вони частково базуються на фізичних принципах, але не всі параметри системи є доступними для вимірювання чи обчислення. Такі моделі поєднують переваги білого та чорного ящика, забезпечуючи баланс між точністю та обчислювальною ефективністю.

Теплові умови комфортності в приміщенні визначаються як фізичними параметрами навколишнього середовища (температура повітря, середня радіаційна температура, швидкість повітряного потоку, парціальний тиск водяної пари), так і антропогенними чинниками (рівень фізичної активності, термічний опір одягу) [33].

Для виявлення комфортних умов у приміщеннях моделі керування мікрокліматом використовують різноманітні набори даних. Вибір конкретної моделі

розрахунку та відповідного набору параметрів залежить від поставлених завдань, типу будівлі, умов експлуатації та вимог до точності прогнозування.

Системи керування мікрокліматом здатні прогнозувати стан внутрішнього середовища на основі моделей, що розпізнають зміни зовнішніх і внутрішніх параметрів. Залежно від складності та призначення, деякі моделі враховують обмежену кількість факторів, що впливають на теплове самопочуття людини, і мають вузькоспеціалізоване застосування. Найбільшого поширення набули моделі, що базуються на індексі PMV (Predicted Mean Vote), завдяки своїй гнучкості, комплексності та здатності враховувати широкий спектр параметрів.

Підвищення якості теплового комфорту в будівлях тісно пов'язане з використанням стандартизованих показників, що визначаються на основі енергетичної моделі людини. Для оцінки умов комфортності застосовуються шкали: PMV – прогнозована середня оцінка тепловідчуттів людини та PDD (PPD) – прогнозований процент незадоволених осіб [34].

На основі цих індексів визначаються три зони комфортності: А, В і С [35]. Індекс PMV розраховується з урахуванням теплового балансу людського тіла, включаючи внутрішню генерацію тепла та теплообмін із навколишнім середовищем. Індекс PDD надає кількісну оцінку – очікуваний відсоток людей, незадоволених температурними умовами в приміщенні.

Зазначені індекси широко використовуються в країнах Західної Європи, тоді як у США застосовується альтернативна шкала комфортності [36].

В Україні параметри мікроклімату та критерії комфортності регламентуються такими нормативними документами:

1. ДСТУ Б EN 15251:2011 Визначає розрахункові параметри мікроклімату для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель. Встановлює чотири категорії комфортності залежно від значення PMV та тривалості перебування людини [37].

2. ДСТУ Б EN 15261:2012 Містить методику розрахунку параметрів мікроклімату [38].

3. ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 Описує аналітичне визначення та інтерпретацію показників PMV і PPD, а також критерії локального теплового дискомфорту [34].

Таблиця 1.4. Приклади рекомендованих категорій для проєктування будівель із механічним опаленням та охолодженням

Категорія	Тепловий стан будівлі в цілому	
	<i>PPD</i> %	Очікувана середня оцінка ступеня комфорту (індекс комфортності) Predicted Mean Vote
I	< 6	$-0,2 < PMV < +0,2$
II	<10	$-0,5 < PMV < +0,5$
II	<15	$-0,7 < PMV < +0,7$
IV	>15	$PMV < -0,7$ ; або (or) $+0,7 < PMV$

4. ДСТУ Б EN 15603:2012 Енергоефективність будівель. Загальне енергоспоживання та визначення енергетичних показників [39]. У зазначеному стандарті наведено два основних типи енергетичних оцінок будівель, а саме: розрахована та виміряна. Введено поняття енергопотреба, первинна енергія, коефіцієнт первинної енергії.

Таким чином, в умовах зростання вимог до якості мікроклімату в будівлях, особливо в контексті енергоефективності, надзвичайно важливим є комплексний підхід до оцінки комфортної температури повітря. Врахування як параметрів навколишнього середовища (температура, вологість, швидкість повітряного потоку, радіаційна температура), так і антропогенних чинників (рівень фізичної активності, термічний опір одягу) дозволяє: оптимізувати температуру повітря без втрати якості теплового комфорту, зменшити енергоспоживання систем опалення та кондиціонування, забезпечити відповідність сучасним стандартам (PMV/PPD, ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 тощо), підвищити загальну ефективність системи керування мікрокліматом.

Такий підхід є основою для розробки адаптивних моделей керування, здатних забезпечити баланс між комфортом і енергозбереженням, що є ключовим завданням сталого будівництва та експлуатації будівель.

Таблиця 1.5. Сфери застосування зазначених категорій:

Категорія	Пояснення
I	Високий рівень очікувань, рекомендований для приміщень, що займають дуже чутливі та слабкі люди з особливими потребами, такі як інваліди, хворі, маленькі діти люди похилого віку.
II	Нормальний рівень очікувань має використовуватися для нових будівель та реновації
III	Допустимий середній рівень очікувань може бути використаний для існуючих будівель
IV	Значення поза межами критеріїв вищезгаданих категорій. Ця категорія має прийматися для обмеженого періоду.

Ефективне використання теплової енергії житловими будівлями є одним із ключових завдань сучасної енергетичної політики. Водночас забезпечення належних умов теплового комфорту у приміщеннях набуває особливої актуальності в умовах зростання вимог до енергозбереження. Досягнення балансу між енергетичною ефективністю та комфортом без шкоди для здоров'я людини становить основний виклик для фахівців у сфері проектування та експлуатації будівель.

У цьому контексті математичні моделі теплових відчуттів людини, що враховують різноманітні параметри навколишнього середовища, є необхідним інструментом для: проектування систем теплопостачання, оптимізації режимів їх роботи, забезпечення відповідності нормативним вимогам щодо комфорту.

Забезпечення умов комфортності виступає не лише як ціль, а й як обмежувальний фактор у процесі підвищення енергоефективності. Саме тому моделювання теплового самопочуття людини є предметом активних досліджень, що тривають з 1970-х років [40] (рис. 1.5).

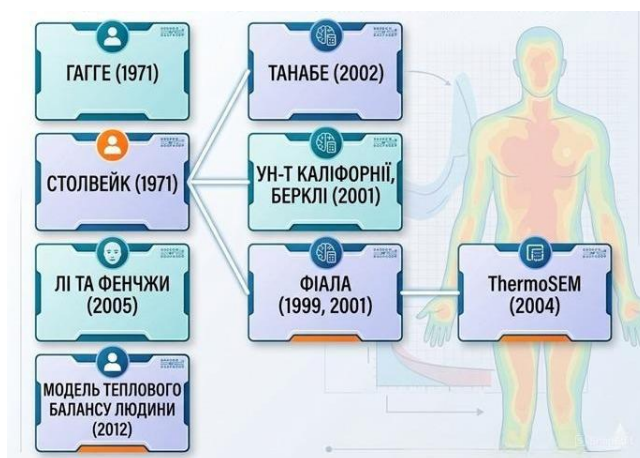


Рисунок 1.5 Розвиток термopsихологічних моделей

Серед відомих моделей, що передбачають теплові відчуття людини, слід виділити:

Модель А. Р. Gagga [41] – двовузлова енергетична модель, яка дозволяє прогнозувати тепловідчуття за перехідних умов навколишнього середовища. Вона враховує теплообмін між центральною частиною тіла та шкірою, а також взаємодію з зовнішнім середовищем.

Емпірична модель Fanger [42] – покладена в основу міжнародного стандарту ISO 7730 [17], що визначає показники PMV та PPD. Модель враховує: інтенсивність діяльності, тип одягу, температуру повітря у приміщенні ( $t_a$ ), середню радіаційну температуру ( $t_r$ ), швидкість руху повітря, відносну вологість.

Модель [6] встановлює залежність між температурою повітря ( $t_a$ ) та середньою радіаційною температурою ( $t_r$ ) у зимовий період, з урахуванням рівня фізичної активності людини. Це дозволяє точніше визначати допустимі межі температурного режиму без втрати комфорту.

Існують також інші моделі теплового комфорту, що враховують взаємозв'язок між: температурою повітря, середньою радіаційною температурою, швидкістю руху повітря, атмосферним тиском.

Однією з таких є модель Ван – Зулена, яка пропонує альтернативний підхід до оцінки теплового балансу людини в умовах змінного мікроклімату.

$$S = 7,83 - 0.1 \cdot t_b - 0.0968 \cdot t_p - 0.0372 \cdot P_n + 0.0367 \cdot v^{0.5} \cdot (37.8 - -t_b), \quad (21)$$

де – показник теплового відчуття людини: 1 – жарко; 2 – тепло; 3 – приємно тепло; 4 – комфортно; 5 – приємно прохолодно; 6 – холодно; 7 – дуже холодно;

$t_b$  – температура повітря у кімнаті, °С;

$t_p$  – середня радіаційна температура приміщення, °С;

$P_n$  – парціальний тиск, бар;

$v$  – швидкість руху повітря у кімнаті, м/с.

А також модель Уінслоу С.Є та Гейджа А.П.:

$$S = 11.16 - 0.0556 \cdot t_b - 0.0538 \cdot t_p - 0.0372 \cdot P_n + 0.014 \cdot v^{0.5} \cdot (37.8 - -t_b), \quad (22)$$

У порівнянні з базовими моделями теплового комфорту (21–22), модель Фангера [42] вирізняється високим ступенем обґрунтованості, оскільки побудована на основі великої кількості емпіричних досліджень. Її перевагою є об'єктивність отриманих результатів, що забезпечує широке застосування в міжнародних стандартах (зокрема ISO 7730).

Сучасні дослідники розглядають людину як складну терморегуляційну систему, що складається з 18 вузлів, кожен з яких відповідає за окремі фізіологічні та теплотехнічні процеси. На основі цієї концепції розробляються нейронні моделі, які дозволяють моделювати контроль потоку крові до шкіри – ключовий механізм терморегуляції, що безпосередньо впливає на суб'єктивне відчуття теплового комфорту.

Інноваційним напрямом є застосування ексергетичного підходу, який базується на принципах енергетичного аналізу. Суть цього підходу полягає у: визначенні мінімального споживання ексергії людським тілом, оцінці умов мінімальної деструкції ексергії у двовузловій моделі організму, врахуванні впливу зовнішніх та внутрішніх факторів – температури, вологості, активності, одягу тощо.

Такий підхід дозволяє не лише оцінити ефективність теплообміну, а й оптимізувати параметри мікроклімату з урахуванням фізіологічних потреб людини. Це відкриває перспективи для створення адаптивних систем керування, здатних забезпечити комфорт за мінімального енергоспоживання.

Адаптивна модель теплового комфорту встановлює залежність між операційною температурою приміщення та середньою щомісячною температурою зовнішнього повітря, що дозволяє враховувати зміну кліматичних умов у процесі оцінки комфортності. Такий підхід реалізовано в:

- американському стандарті ASHRAE 55:2004 [43];
- європейському стандарті EN 15251;
- біокліматичній діаграмі Givoni [44-45].

Врахування адаптивного теплового комфорту в енергетичному та ексергетичному аналізі будівель є важливим, проте недостатньо дослідженим

напрямом, що відкриває перспективи для підвищення точності оцінки енергоефективності.

Залежно від цілей дослідження, науковці застосовують моделі, що базуються на:

енергетичних балансах [46-47];

ексергетичних балансах [48–51].

У дослідженні М. Shukuuya [48] представлено концепцію ексергетичного аналізу людського тіла для типових та перехідних умов. Встановлено, що мінімальне споживання ексергії, якщо відлік ведеться від температури повітря у приміщенні, відповідає тепловідчуттю «дещо прохолодно» [50].

Однак, як показано у [51], мінімальні значення руйнування ексергії не завжди корелюють із суб'єктивним комфортом. Тому під час ексергетичного аналізу важливо оцінювати: ексергію, що руйнується та ексергію, яка надходить у навколишнє середовище.

Стаціонарна модель теплового комфорту, а також розрахунок споживання ексергії людським тілом, реалізовані у програмному середовищі Excel за допомогою інструменту, розробленого Hideo Asada [52].


Вхідні дані (рис. 1.6): параметри довкілля, мікроклімату приміщення та фізіологічні характеристики людини.

Вихідні дані (рис. 1.7): відсоткове співвідношення складників ексергетичних потоків, значення PMV.

Ці таблиці дозволяють оцінити споживання ексергії людським тілом для заданих умов. Водночас, для вибору та проектування джерела теплоти, критично важливо визначити температуру повітря, що відповідає мінімуму ексергійного споживання.

Оцінка впливу людських факторів (активність, одяг, терморегуляція) та параметрів будівлі (теплоізоляція, вентиляція, інсоляція) на комфортну температуру дозволяє: максимально знизити температуру повітря без втрати комфорту, зменшити енергоспоживання систем опалення та кондиціонування, підвищити загальну енергоефективність будівлі.

Таблиця для розрахунку складових ексергетичного балансу для людського тіла  
Розроблено Н. Asada 2.06.2010



**Input values**

**Вхідні дані**

Довкілля	Температура повітря	33,5 °C
	Відносна вологість	80 %

**Повітря у приміщенні**

Температура повітря	35,5 °C
Середня радіаційна температура	35,0 °C
Відносна вологість	80,0 %
Швидкість руху повітря	0,07 m/s

**Модель дослідження**

Ширина	Увaga!!	5 m
Глибина	Ці дані не впливають на результати розрахунку складових ексергетичного балансу людини та не можна вводити нульові значення	5 m
Висота		2,4 m

**Людське тіло**

Одяг	0,63 clo
Діяльність	1,1 met 1met=58.2 W/m

**Розрахунки**

Execute calculaion

Рисунок 1.6 – Вхідні дані для розрахунку складників ексергетичного балансу людського тіла

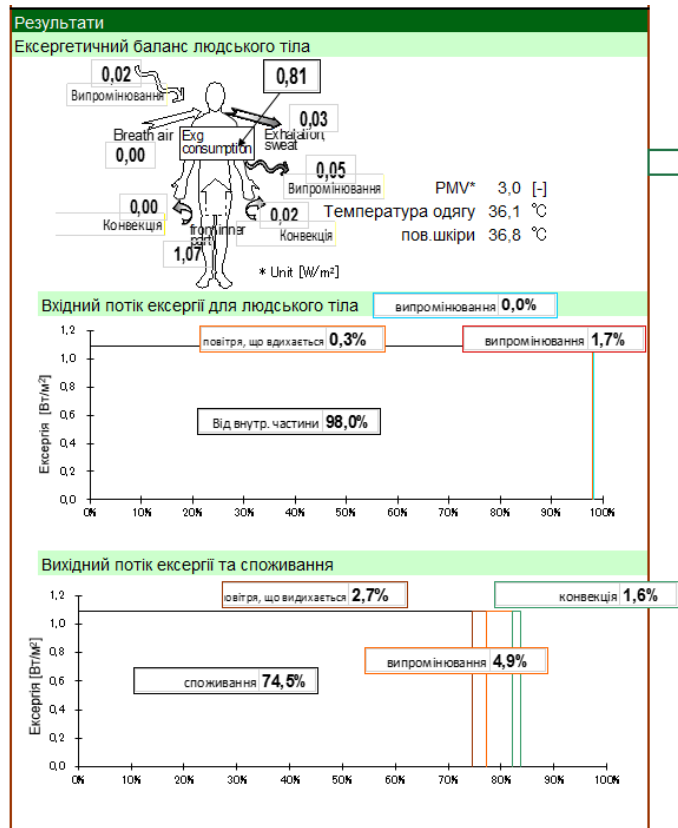


Рисунок 1.7 – Вихідні дані розрахунку складників ексергетичного балансу для оболонки людського тіла

Для оцінки теплового комфорту людини в приміщенні визначають шість основних параметрів, які умовно поділяються на:

**Об'єктивні параметри навколишнього середовища:**

- температура повітря в кімнаті;
- середня радіаційна температура;
- швидкість руху повітря;
- відносна вологість.

**Суб'єктивні параметри, що залежать від людини:**

- ступінь метаболізму (інтенсивність фізичної активності);
- термічний опір одягу.

Серед зазначених змінних середня радіаційна температура є однією з найскладніших для аналізу, оскільки вона залежить від геометрії приміщення, матеріалів поверхонь, їхніх температур та здатності до теплового випромінювання. Цей параметр відіграє критичну роль у формуванні енергетичного балансу людського тіла, оскільки визначає інтенсивність теплообміну шляхом радіації – одного з трьох основних механізмів теплопередачі.

У зв'язку з цим, точне визначення середньої радіаційної температури є необхідним для:

- коректного розрахунку індексів PMV/PPD;
- побудови адаптивних та ексергетичних моделей теплового комфорту;
- оптимізації параметрів мікроклімату без надмірного енергоспоживання.

Для оцінки рівня теплового комфорту широко застосовується метод, представлений у міжнародному стандарті ISO 7730 [34], який адаптує та розвиває підхід, запропонований П.О. Фангером. Цей метод базується на рівняннях теплового балансу оболонки людського тіла, що враховують:

- внутрішню генерацію тепла внаслідок метаболічної активності;
- теплообмін між тілом і навколишнім середовищем через конвекцію, випромінювання, теплопровідність та випаровування;
- вплив термічного опору одягу;

– параметри мікроклімату приміщення (температура повітря, середня радіаційна температура, вологість, швидкість руху повітря).

На основі цих рівнянь розраховуються два ключові індекси:

PMV (Predicted Mean Vote) – прогнозована середня оцінка теплового самопочуття людини за семибальною шкалою від –3 (холодно) до +3 (дуже жарко);

PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) – прогнозований відсоток людей, незадоволених тепловими умовами.

Ці показники розраховуються на основі комплексу параметрів, що характеризують мікрокліматичні умови та фізіологічні особливості людини, зокрема: температура повітря, середня температура випромінювання, відносна швидкість руху повітря, відносна вологість, парціальний тиск водяної пари, термічний опір одягу, рівень метаболічної активності, зовнішня механічна робота.

Отримане значення PMV інтерпретується за семибальною шкалою теплового сприйняття, що охоплює діапазон від –3 до +3:

Згідно зі стандартом, оптимальним рівнем комфорту вважається інтервал PMV від –0,5 до +0,5, що відповідає мінімальному значенню PPD (менше 10%).

Таблиця 1.6 – Семибальна шкала чутливості до температури

Прогнозована середня оцінка PMV	Трактування оцінки
+3	Спекотно
+2	Тепло
+1	Трохи тепло
0	Нейтрально
-1	Трохи прохолодно
-2	Прохолодно
-3	Холодно

Згідно з положеннями ДСТУ Б EN ISO 7730:2011, застосування показників PMV та PPD є коректним лише за умови дотримання певних обмежень діапазону параметрів, які наведені у таблиці 2.

Ці обмеження забезпечують валідність моделі Фангера та її відповідність реальним умовам експериментального підтвердження.

Таблиця 1.7 – Узагальнений перелік типових обмежень, які мають бути виконані для коректного використання PMV/PPD

Параметр	Обмеження
Прогнозована середня оцінка PMV	від -2 до +2
Температура повітря	від 10 °С до 30 °С
Середня температура випромінювання	від 10 °С до 40 °С
Відносна швидкість повітря	від 0 м/с до 1 м/с
Парціальний тиск водяної пари	від 0 Па до 2700 Па
Одяг	від 0 м <sup>2</sup> ·К/Вт до 0,31 м <sup>2</sup> ·К/Вт
Швидкість обміну речовин	від 46 Вт/м <sup>2</sup> до 232 Вт/м <sup>2</sup>

Вихід за межі цих діапазонів може призвести до некоректного прогнозування PMV/PPD, оскільки модель не враховує екстремальні або нестандартні умови (наприклад, фізичне навантаження понад 4 мет, або перебування у спеціальному захисному одязі).

Перед застосуванням моделі Фангера в аналізі мікроклімату, необхідно перевірити відповідність усіх вхідних параметрів зазначеним обмеженням. Це є критично важливим для точності оцінки теплового комфорту та прийняття рішень щодо регулювання умов у приміщенні.

Метод дозволяє кількісно оцінити тепловий комфорт у приміщенні та є основою для: проектування систем опалення, вентиляції та кондиціонування, енергетичного моделювання будівель, розробки стандартів мікроклімату для житлових і громадських споруд.

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-2,1 \cdot M} + 0,028) \cdot [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}];$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)}, \quad (22)$$

де  $M$  – ступінь метаболізму, Вт/м<sup>2</sup>;

$W$  – ефективна механічна робота, Вт/м<sup>2</sup>;

$H$  – втрати теплоти випромінюванням (sensitive heat losses), Вт/м<sup>2</sup>;

$E_c$  – теплообмін шляхом випаровування зі шкіри, Вт/м<sup>2</sup>;

$C_{res}$  – теплообмін конвекцією, під час дихання, Вт/м<sup>2</sup>;

$E_{res}$  – теплообмін випаровуванням під час дихання, Вт/м<sup>2</sup>;

$$H = 3,96 \cdot 10^8 \cdot f_{cl} \cdot \left[ (t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \right] - f_{cl} \cdot h_{cl} \cdot (t_{cl} - t_a), \quad (23)$$

$$E_c = 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15], \quad (24)$$

$$C_{res} = 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a), \quad (25)$$

$$E_{res} = 1,7 \cdot 10^5 \cdot M \cdot (5867 - p_a), \quad (26)$$

де  $f_{cl}$  – фактор, що враховує площу поверхні одягу;  $t_a$  – температура повітря, °C;

$t_r$  – середня радіаційна температура, °C;

$t_{cl}$  – температура поверхні одягу, °C;

$p_a$  – парціальний тиск пари у повітрі, Па;

$I_{cl}$  – термічний опір одягу,  $m^2 \cdot ^\circ C / \text{Вт}$ ;

$v_{air}$  – відносна швидкість руху повітря, м/с;

$h_{cl}$  – коефіцієнт конвективного теплообміну,  $\text{Вт}/m^2 \cdot K$ .

Дані щодо значення метаболізму, залежно від виду діяльності людини та термічного опору одягу представлені у табл.1.8

Таблиця 1.8 – Параметри людського тіла

Коефіцієнт теплоізоляції одягу [52]

Одяг	
Без одягу	0
Нижня білизна	0,05
Шорти	0,1
Звичайний тропічний костюм: шорти, сорочка з коротким рукавом, легка нижня білизна	0,3
Легкий літній одяг: довгі легкі штани, сорочка на короткий рукав, нижня білизна	0,5
Легкий тропічний костюм	0,8
Звичайний бізнес костюм	1
Традиційний північноєвропейський костюм з жилетом, нижньою білизною на довгий рукав, піджаком	1,5
Полярний одяг	3–4

Швидкість обміну речовин [52]

Діяльність	met
Сон	0,8
Сидіння	1
Друк	1,2
Стояння	1,4
Звичайна стояча робота в магазині, лабораторії, на кухні	1,6–2
Повільна хода (3 км/год)	2
Нормальна хода (5 км/год)	2,6
Швидка хода (7 км/год)	4
Робота столяра чи будівельника	3
Біг (10 км/год)	8

1 met=58,2 Вт/м<sup>2</sup>

1 clo=0,155 м<sup>2</sup>·°C/Вт

Однією з ключових проблем при застосуванні методу Фангера для оцінки теплового комфорту є те, що температура поверхні одягу не є відомою наперед. Її значення залежить від складної взаємодії між тілом людини, шаром одягу та навколишнім середовищем.

Для визначення цього параметра застосовується ітераційний метод, що базується на рівнянні теплового балансу для шару одягу [34]. У процесі розрахунку враховуються:

- тепловий потік від тіла до внутрішньої поверхні одягу;
- тепловіддача з зовнішньої поверхні одягу до навколишнього середовища (випромінювання, конвекція);
- термічний опір матеріалу одягу;
- вплив вологості та швидкості руху повітря.

Ітераційний підхід дозволяє поступово уточнювати значення температури поверхні одягу до досягнення теплової рівноваги, тобто стану, за якого теплові потоки на межі «тіло–одяг» та «одяг–середовище» врівноважуються.

Цей етап розрахунку є критично важливим для: точного визначення індексу PMV, оцінки теплового комфорту в умовах змінного мікроклімату, моделювання теплообміну в системах адаптивного керування.

$$(t_{sk} - t_{cl}) = 3,96 \cdot 10^8 \cdot f_{cl} \cdot \left[ (t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \right] + f_{cl} \cdot h_{cl} \cdot (t_{cl} - t_a), \quad (27)$$

$$t_{sk} = 35,7 - 0,028(M - W). \quad (28)$$

Коефіцієнт конвективного теплообміну визначається наступним чином:

$$h_c = \begin{cases} 2,38 |t_{cl} - t_a|^{0,25}, & \text{якщо } 2,38 |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \sqrt{v_{ar}}, \\ 12,1 \sqrt{v_{ar}}, & \text{якщо } 2,38 |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \sqrt{v_{ar}}, \end{cases} \quad (29)$$

Фактор, що враховує площу поверхні одягу:

$$f_d = \begin{cases} 1,00 + 1,29 \cdot I_{cl}, & \text{якщо } I_{cl} \leq 0,78 \frac{M^2 K}{Wm} \\ 1,05 + 1,645 \cdot I_{cl}, & \text{якщо } I_{cl} > 0,78 \frac{M^2 K}{Wm}. \end{cases} \quad (30)$$

Аналіз діапазонів параметрів, у межах яких допустиме використання показників PMV та PPD, засвідчив, що вони є більш широкими, ніж ті, що встановлені у Державних санітарних нормах України щодо мікроклімату виробничих та громадських приміщень. Зокрема:

Температурні межі моделі PMV охоплюють ширший діапазон (10–30 °C), тоді як санітарні норми часто встановлюють більш вузькі межі, наприклад 18–24 °C для офісних приміщень.

Вологість, швидкість повітря та інші параметри також мають допустимі значення у моделі, що виходять за межі нормативних вимог, але не суперечать їм.

Завдяки цьому, обмеження моделі Фангера не є критичними для більшості типів приміщень, що експлуатуються в Україні. Це дозволяє вільно застосовувати PMV/PPD як інструмент оцінки теплового комфорту в межах чинних санітарних норм, не порушуючи їх вимог.

## **1.5 Висновки**

Аналіз сучасного стану та проблематики процесу опалення багатокімнатних будівель показав, що на сьогодні достатньо широкого розповсюдження у будівництві набуло використання оцінки теплового комфорту на основі індексів прогнозованої середньої оцінки якості повітряного середовища PMV та прогнозованого відсотка незадоволених температурою середовища PPD. Однак питання автоматизації процесу керування опаленням багатокімнатних будинків за цими показниками майже не розглядається при тому, що їх використання дозволяє отримати більш повну та якісну оцінку теплового комфорту та у деяких випадках зменшити витрати енергоресурсів. Таким чином завдання автоматизації процесу керування опаленням за тепловим комфортом є актуальним, що потребує вирішення наступних питань:

1. Розробити модель процесу опалення багатокімнатного приміщення з урахуванням параметрів необхідних для розрахунку індексів теплового комфорту: об'єм та розміщення приміщення, потужність нагрівача, температура, відносна вологість та швидкість повітря, тип одягу та навантаження людини;

2. Дослідити можливість зменшення енерговитрат за рахунок керування тепловим комфортом на підставі індексів прогнозованої середньої оцінки якості повітряного середовища PMV та прогнозованого відсотка невдоволених температурою середовища PDD.

3. Розробити структуру системи автоматизованого керування процесом опалення за тепловим комфортом у багатокімнатному приміщенні та створити на її підставі відповідну модель.

4. Дослідити процес керування опаленням за тепловим комфортом з урахуванням обмежень санітарно-гігієнічних норм з метою визначення можливостей зменшення енергетичних витрат.

5. Розробити структуру автоматизованої системи керування процесом опалення у багатокімнатному приміщенні, яка складається з автоматичної системи керування тепловим комфортом на підставі індексів прогнозованої середньої оцінки якості повітряного середовища PMV і прогнозованого відсотка незадоволених температурою середовища PPD та автоматизованого робочого місця оператора. Обґрунтувати та запропонувати комплекс технічних засобів, необхідних для реалізації системи, включаючи: пристрій керування, інтерфейси зв'язку, датчики, виконавчі пристрої.

6. Проаналізувати можливості використання запропонованого підходу до процесу опалення багатокімнатних будинків у вже існуючих системах.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЮЮЧИХ МОЖЛИВОСТЕЙ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ КОМФОРТОМ У ПРИМІЩЕННІ

#### 2.1 Структура моделі системи опалення у приміщенні

На основі аналізу положень ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 було визначено структуру об'єкта керування, що дозволяє забезпечити та підтримувати тепловий комфорт у приміщенні. Визначено набір вхідних та вихідних параметрів, які формують основу для розрахунку показників PMV та PPD.

Вхідні параметри – це керовані змінні, що впливають на тепловий стан середовища:

- Потужність нагрівача;
- Потужність охолоджувача (кондиціонера або системи вентиляції).

Вихідні параметри – це фізичні та фізіологічні характеристики, які використовуються для розрахунку PMV/PPD:

- Температура повітря;
- Відносна вологість;
- Відносна швидкість руху повітря;
- Парціальний тиск водяної пари;
- Середня температура випромінювання;
- Тепловий опір одягу (clo);
- Швидкість обміну речовин (метаболізм);
- Зовнішня механічна робота.

Результатом аналізу стало формування структурної моделі об'єкта керування, яка включає:

- Приміщення як фізичне середовище, де відбувається теплообмін;
- Модуль розрахунку показників теплового комфорту, що реалізує алгоритм визначення PMV/PPD на основі вихідних параметрів.

Така структура дозволяє реалізувати систему автоматичного керування мікрокліматом, орієнтовану на підтримання оптимального рівня теплового комфорту відповідно до міжнародних стандартів.

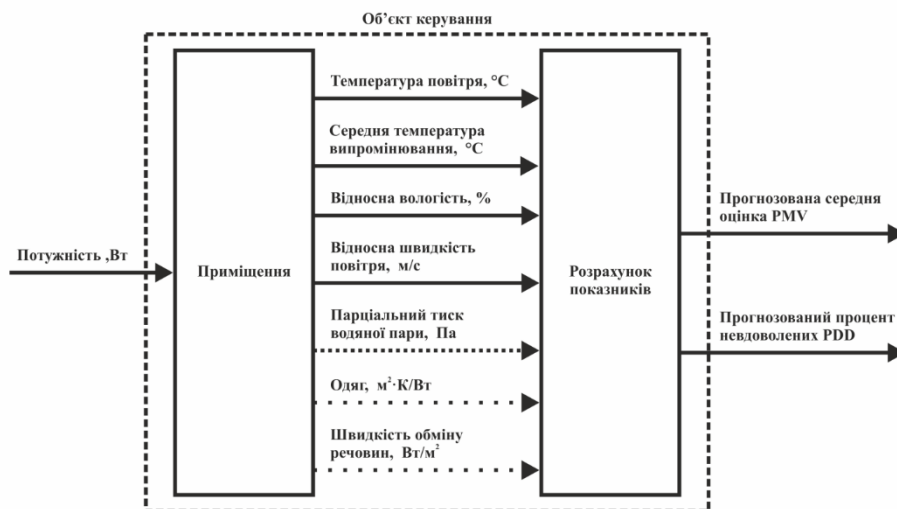


Рисунок 2.1 – Структура об'єкта керування

У межах моделі теплового комфорту, що базується на відповідному стандарті, об'єкт керування може бути представлений як динамічна система, в якій реалізується вплив керуючих дій на мікрокліматичні умови з метою досягнення бажаного рівня комфорту.

Вхідні параметри: потужність нагрівача, потужність охолоджувача (кондиціонера, вентиляційної установки тощо).

Вихідні параметри: PMV (Predicted Mean Vote) – прогнозована середня оцінка теплового сприйняття та PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) – прогнозований відсоток незадоволених.

Внутрішні параметри, які впливають на розрахунок PMV/PPD, можуть бути виміряні за допомогою сенсорів у реальному часі: температура повітря, середня температура випромінювання, відносна вологість, відносна швидкість руху повітря.

Інтеграція сенсорних даних дозволяє формувати актуальну інформаційну модель мікроклімату, яка є основою для обчислення PMV/PPD та прийняття керуючих рішень. Таким чином, об'єкт керування набуває кіберфізичної структури, де фізичне середовище (приміщення) взаємодіє з цифровою моделлю оцінки комфорту.

Парціальний тиск водяної пари розраховується як:

$$\rho_a = RH \cdot 10 \cdot e^{16,6536 - 4030,183 / (t_a + 235)}, \quad (1)$$

де  $\rho_a$  – парціальний тиск водяної пари, Па;  $RH$  – відносна вологість, %;  $t_a$  – температура повітря, °С.

Згідно з положеннями, значення таких фізіологічних параметрів, як:

- тепловий опір одягу ( $clo$ ) – визначається за таблицями, наведеними у Додатку С;
- швидкість обміну речовин ( $met$ ) – визначається за таблицями з Додатку В.

Альтернативно, ці параметри можуть бути встановлені відповідно до міжнародних стандартів:

- ISO 9920 – для оцінки теплоізоляційних властивостей одягу;
- ISO 8996 – для визначення рівня метаболічної активності залежно від виду діяльності.

З урахуванням сучасного розвитку цифрових технологій, зазначені параметри можуть бути визначені автоматично на основі: пори року, зовнішньої температури повітря, прогнозу погоди, типу діяльності користувача, особистих налаштувань у мобільному додатку або системі керування мікрокліматом.

Такий підхід дозволяє реалізувати адаптивну модель теплового комфорту, яка враховує не лише фізичні умови середовища, а й індивідуальні особливості користувача, підвищуючи точність розрахунку показників PMV/PPD та ефективність системи керування.

## **2.2 Розробка моделі опалення приміщенні**

### **2.2.1 Модель нагрівача**

Для цілей моделювання процесу теплового регулювання обігрівач розглядається як аперіодична ланка першого порядку, для якої необхідно визначити діапазон вхідного значення, коефіцієнт посилення та постійну часу.

На основі емпіричних даних щодо експлуатації електричних обігрівачів встановлено, що їх фактична теплова потужність зазвичай завищена на 10–20% порівняно з номінальними характеристиками. Враховуючи це, дійсна потужність обігрівача може бути визначена як:

$$P_{0д} = P_0 \cdot (1 - K_0) = 2000 \text{ Вт} \cdot (1 - 0,2) = 1600 \text{ Вт}, \quad (1)$$

де  $P_{0д}$  – дійсна потужність обігрівача, Вт;  $P_0$  – потужність обігрівача, Вт;  $K_0$  – поправочний коефіцієнт.

Це уточнення дозволяє більш точно оцінити тепловий вплив обігрівача на мікроклімат приміщення та забезпечити адекватність моделі при подальшому аналізі динаміки температури.

Виходячи з технічних характеристик обігрівача, а також з урахуванням динаміки його теплової реакції, час нагріву системи до встановленого рівня температури приймається рівним:

$$T_0 = T_{HO}/5 = 30 \text{ хв} \cdot 60 \text{ с}/5 = 360 \text{ с}. \quad (2)$$

Це значення використовується для побудови математичної моделі теплової динаміки приміщення та подальшого аналізу ефективності системи керування мікрокліматом.

Виходячи з геометричних параметрів приміщення та дійсної потужності обігрівача, можливо визначити діапазон керування температурою в межах заданих умов експлуатації:

$$\Delta t_K = \frac{P_0 \cdot 0,85}{V} = \frac{1600 \text{ Вт} \cdot 0,85 \frac{\text{°С} \cdot \text{м}^3}{\text{Вт}}}{30 \text{ м}^3} = 45,3 \text{ °С}. \quad (3)$$

Таким чином, при заданих умовах обігрівач здатен забезпечити збільшення температури повітря, що охоплює бажаний рівень і залишає резерв для адаптивного регулювання.

### **2.2.1 Модель приміщення**

Для дослідження процесу автоматизованого керування тепловим комфортом необхідно побудувати математичну модель приміщення, яка відображає взаємозв'язок між керуючими діями, параметрами мікроклімату та індикаторами комфортності. Така модель повинна включати набір змінних, що характеризують як фізичні умови середовища, так і фізіологічні особливості користувачів.

Основні параметри моделі:

Керуючі змінні (вхідні параметри): потужність охолоджувача, потужність нагрівача.

Станові змінні (внутрішні параметри): температура повітря у приміщенні, середня температура випромінювання, відносна вологість, відносна швидкість руху повітря, зовнішня температура повітря, парціальний тиск водяної пари, тепловий опір одягу, швидкість обміну речовин.

Цільові показники (вихідні параметри): прогнозована середня оцінка теплового комфорту PMV, прогнозований процент незадоволених PPD.

Зважаючи на напрям використання моделі, перехідні характеристики температури повітря та відносної вологості повинні бути наближені до реальних умов експлуатації. Їх динаміка має бути описана аналітичним шляхом, з урахуванням теплофізичних властивостей приміщення та інерційності процесів тепло- та масообміну.

Інші параметри, такі як середня температура випромінювання, швидкість руху повітря, зовнішня температура, парціальний тиск водяної пари, одяг та метаболічна активність, можуть бути задані як константи відповідно до нормативних документів:

– ДСН 3.3.6.042-99 – «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень»;

– ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 – «Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту»;

– ДСТУ Б А.2.2-12:2015 – «Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні».

Структура об'єкта керування, представлена на рис. 2.1, дозволяє реалізувати адаптивну систему підтримання теплового комфорту, яка враховує як нормативні вимоги, так і реальні експлуатаційні умови.

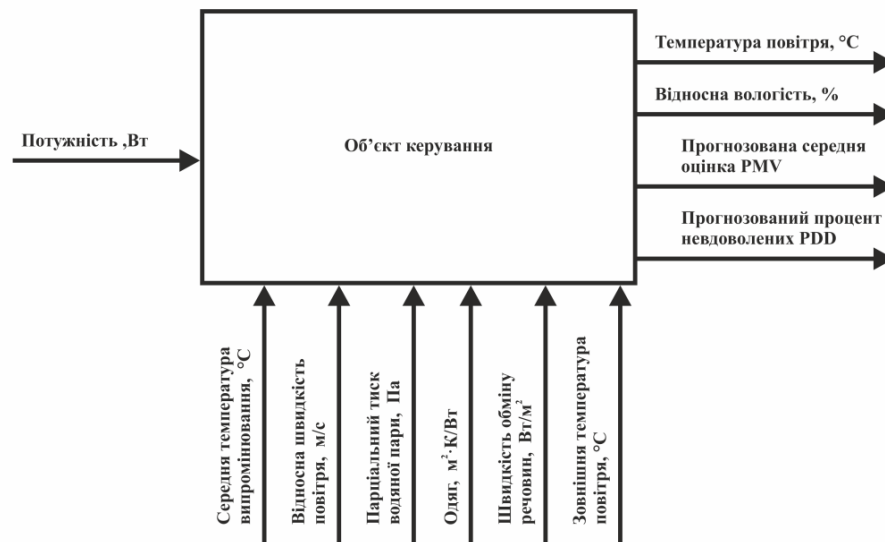


Рисунок 2.2 – Параметри моделі приміщення

У якості об'єкта дослідження розглядається типова кімната, геометричні параметри якої наведено на рис. 2.2.

Просторові характеристики приміщення становлять:

довжина:  $l = 4$  м;

ширина:  $w = 3$  м;

висота:  $h = 2,5$  м;

об'єм:  $V = l w h = 30$  м<sup>3</sup>

Температурні умови:

Зовнішня температура повітря:  $t_3 = -20$  °C;

Початкова температура повітря у приміщенні:  $t_{ПТП} = 10$  °C;

Бажана температура повітря:  $t_B = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Ці параметри використовуються як початкові умови для розрахунку теплового балансу та визначення необхідної потужності нагрівального обладнання. Враховуючи різницю між бажаною та початковою температурою, можна оцінити енергетичні витрати на нагрів повітря до комфортного рівня.

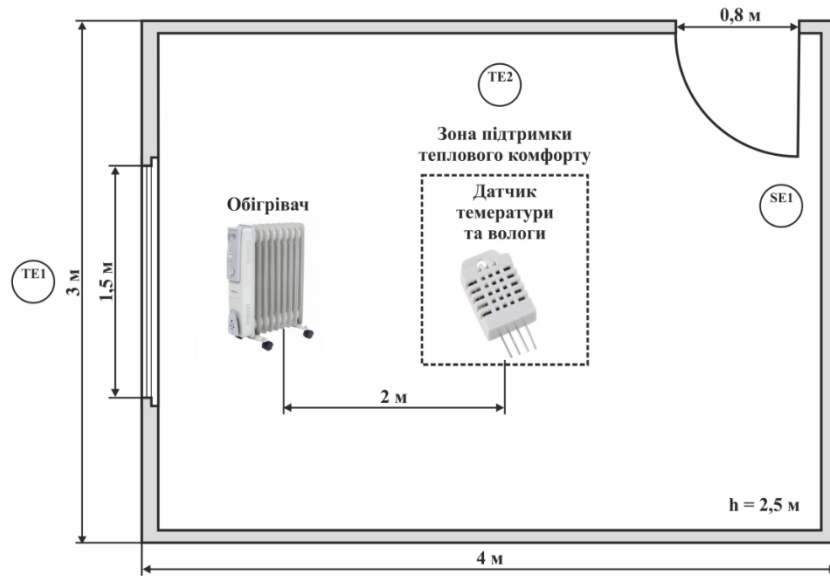


Рисунок 2.3 – Структура приміщення

### 2.2.3 Модель датчика температури

Враховуючи просторове розміщення датчика температури та вологості відносно джерела тепла (рис. 2.3), а також його технічні характеристики, модель датчика температури може бути представлена у вигляді аперіодичної ланки першого порядку із запізненням. Такий підхід дозволяє врахувати теплову інерцію елемента, що впливає на швидкість реакції датчика на зміну температури навколишнього середовища.

Постійна часу датчика визначається його тепловою інерцією, яка для даного типу обрана рівною:

$$T_D = T_{ТІД}/5 = 30 \text{ с}/5 = 6 \text{ с.} \quad (5)$$

Час запізнення сигналу від датчика температури та вологості залежить від відстані між джерелом тепла (обігрівачем) та датчиком, а також від швидкості руху повітря у приміщенні, яка визначає швидкість переносу тепла та вологи.

Згідно з нормативними вимогами, швидкість повітря у приміщенні повинна становити:  $v=0,1$  м/с. Припустимо, що відстань між обігрівачем і датчиком дорівнює  $L$  метрів. Тоді час запізнення  $\tau$  можна наближено оцінити за формулою:

$$\tau_{0\_дт} = l_{0\_дт}/v = 2 \text{ м}/0,1 \text{ м/с} = 20 \text{ с.} \quad (6)$$

Враховуючи структуру об'єкта керування, його вхідні та вихідні параметри, а також технічні та просторові обмеження, було розроблено узагальнену структуру датчика теплового комфорту, що наведена на рисунку 2.4.

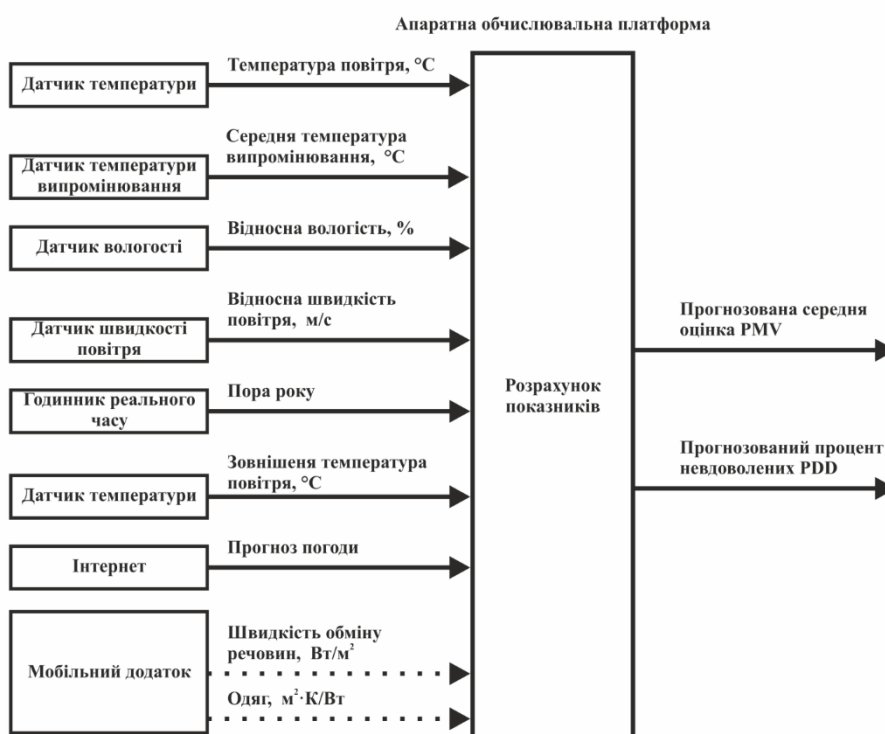


Рисунок 2.4 – Загальна структура датчика теплового комфорту

Цей датчик виконує функцію інтеграції параметрів мікроклімату, необхідних для оцінки теплового самопочуття людини згідно з методологією PMV/PPD, визначеною стандартом ДСТУ Б EN ISO 7730:2011. Структура датчика передбачає обробку таких вхідних величин: температура повітря, середня температура випромінювання, відносна вологість, швидкість руху повітря, парціальний тиск

водяної пари, рівень теплоізоляції одягу, інтенсивність метаболізму, зовнішня механічна робота.

На основі цих параметрів датчик формує вихідні сигнали, які включають: прогнозовану середню оцінку PMV, прогнозований відсоток незадоволених PPD.

Розроблена структура є основою для інтеграції датчика у систему автоматичного керування, забезпечуючи зворотний зв'язок та адаптацію режимів роботи обігрівача відповідно до змін умов у приміщенні.

На основі отриманої структури об'єкта керування, його вхідних та вихідних параметрів, а також з урахуванням технічних обмежень, було розроблено узагальнену структуру датчика теплового комфорту, що може бути використана як: для створення фізичного сенсорного пристрою, так і для апаратно-програмної реалізації у складі інтелектуальної системи керування мікрокліматом.

Згідно з результатами аналізу нормативного документа ДСТУ Б EN ISO 7730:2011, встановлено, що найбільший вплив на показники теплового комфорту мають: температура повітря, відносна вологість.

Ці параметри є критичними для розрахунку індексу PMV та PPD, які використовуються для оцінки суб'єктивного теплового самопочуття людини.

Виходячи з цього, мінімальна структура датчика теплового комфорту повинна включати такі компоненти:

- Датчик температури – Вимірювання температури повітря у контрольованій зоні
- Датчик вологості – Визначення відносної вологості повітря
- Апаратна обчислювальна платформа – Обробка даних, розрахунок PMV/PPD, формування сигналів керування

#### **2.2.4 Модель опалення приміщення**

Аналіз сучасних підходів до моделювання теплових параметрів приміщень свідчить, що побудова повноцінної моделі потребує врахування низки факторів, зокрема: теплоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій,

геометричних параметрів віконних прорізів, теплових потоків між суміжними приміщеннями, впливу внутрішніх джерел тепла та вентиляційних режимів.

Для реалізації таких моделей, як правило, застосовується спеціалізоване програмне забезпечення [53], що дозволяє здійснювати багатофакторне моделювання з високим ступенем деталізації. Проте, враховуючи специфіку поставленого завдання – дослідження процесу керування тепловим комфортом – використання повномасштабного моделювання є недоцільним через надмірну складність та обчислювальні витрати.

Згідно з працями В.П. Туркіна, модель приміщення може бути адекватно представлена у вигляді аперіодичної ланки першого порядку, що дозволяє описати динаміку зміни температури повітря у спрощеній формі, з достатньою точністю для задач керування.

На основі аналізу літературних джерел [54–56] встановлено, що час нагріву приміщення залежить від початкової температури, потужності нагрівача та теплофізичних характеристик середовища, і зазвичай знаходиться в межах від 20 хвилин до 3 годин.

У рамках даного дослідження прийнято, що зміна температури від початкового значення:  $t_{\text{ПТП}}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до максимальної температури:  $t_{\text{МАКС}}=t_3+\Delta t_{\text{К}}=-20\text{ }^{\circ}\text{C}+45,3\text{ }^{\circ}\text{C}=25,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  відбувається протягом 50 хвилин (3000 с). На основі чисельного експерименту, проведеного з урахуванням теплової інерційності повітряного середовища, постійна часу приміщення визначена як:  $T_{\text{П}}=2825\text{ с}$ .

Це значення використовується для побудови математичної моделі температурної динаміки, яка є основою для розробки алгоритмів керування тепловим комфортом.

Згідно з прийнятим підходом, коефіцієнт посилення  $K$  розраховується як відношення діапазону зміни температури повітря у приміщенні до дійсної потужності обігрівача:

$$k = \Delta t_{\text{К}}/P_{\text{ОД}} = 45,3\text{ }^{\circ}\text{C}/1600\text{ Вт} = 0,0283. \quad (7)$$

Цей коефіцієнт використовується для побудови математичної моделі температурної реакції приміщення та є ключовим параметром при розробці алгоритмів керування тепловим комфортом.

На основі аналізу отриманих часткових моделей, що описують окремі компоненти теплового процесу – зокрема, динаміку обігрівача, повітряного середовища та теплових втрат – встановлено, що узагальнена модель приміщення може бути представлена у вигляді аперіодичної ланки третього порядку із запізненням.

Така структура моделі враховує: інерційність джерела тепла (обігрівач як аперіодична ланка першого порядку), теплову ємність повітряного середовища, теплові втрати через огорожувальні конструкції, затримку реакції системи на зміну керуючої дії, обумовлену фізичними процесами теплообміну.

Математично модель може бути представлена у вигляді передавальної функції:

$$W(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau_{0,DT} s}}{(T_0 s + 1) \cdot (T_{\Pi} s + 1) \cdot (T_{DT} s + 1)} = \frac{0,0283 \cdot e^{-20s}}{(360s + 1) \cdot (2825s + 1) \cdot (6s + 1)} \quad (8)$$

Така модель дозволяє адекватно описати динаміку зміни температури у приміщенні в умовах реального керування, забезпечуючи основу для синтезу регуляторів теплового комфорту з урахуванням інерційності та запізнення.

На основі отриманої передавальної функції, що описує узагальнену динаміку теплового процесу в приміщенні, було створено відповідну імітаційну модель у графічному середовищі Simulink математичного пакету MATLAB. Модель реалізує аперіодичну ланку третього порядку із запізненням, що дозволяє адекватно відтворити інерційні властивості системи та її реакцію на зміну керуючих дій.

Для аналізу ефективності процесу керування тепловим комфортом відповідно до вимог ДСТУ Б EN ISO 7730:2011, розроблено програмний блок, який виконує розрахунок двох основних індикаторів: PMV та PPD. Розрахунок цих показників здійснюється на основі таких параметрів: температура повітря у

приміщенні, середня температура випромінювання, відносна швидкість руху повітря, відносна вологість, парціальний тиск водяної пари, термічний опір одягу, швидкість обміну речовин, зовнішня механічна робота.

Для наочного представлення функціонування моделі, на її основі було побудовано систему автоматичного керування, реалізовану у вигляді двопозиційного регулятора. Такий регулятор забезпечує перемикавання між двома станами (ввімкнено/вимкнено) залежно від відхилення температури від заданого значення, що дозволяє підтримувати тепловий комфорт у межах допустимого діапазону.

Схема системи керування наведена на рисунку 2.5, де відображено взаємодію між математичною моделлю приміщення, блоком розрахунку PMV/PPD та логікою регулятора.

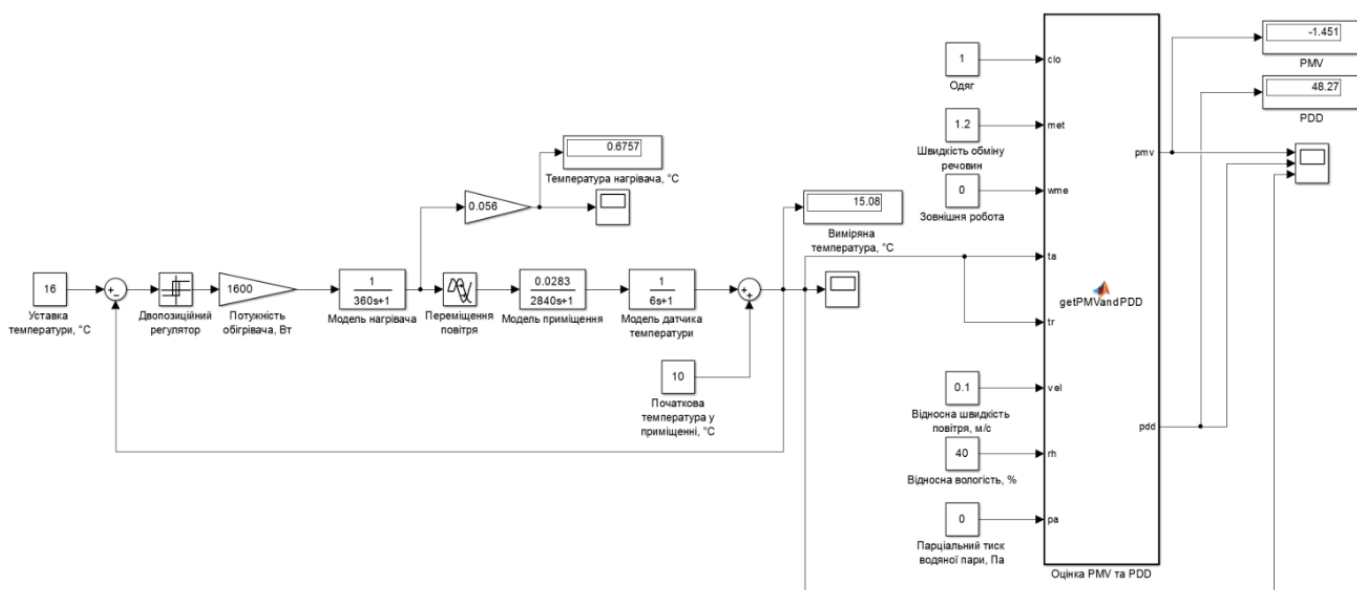


Рисунок 2.5 – Модель опалення приміщення

Результати моделювання процесу керування температурою у приміщенні наведені на рисунку 2.6.

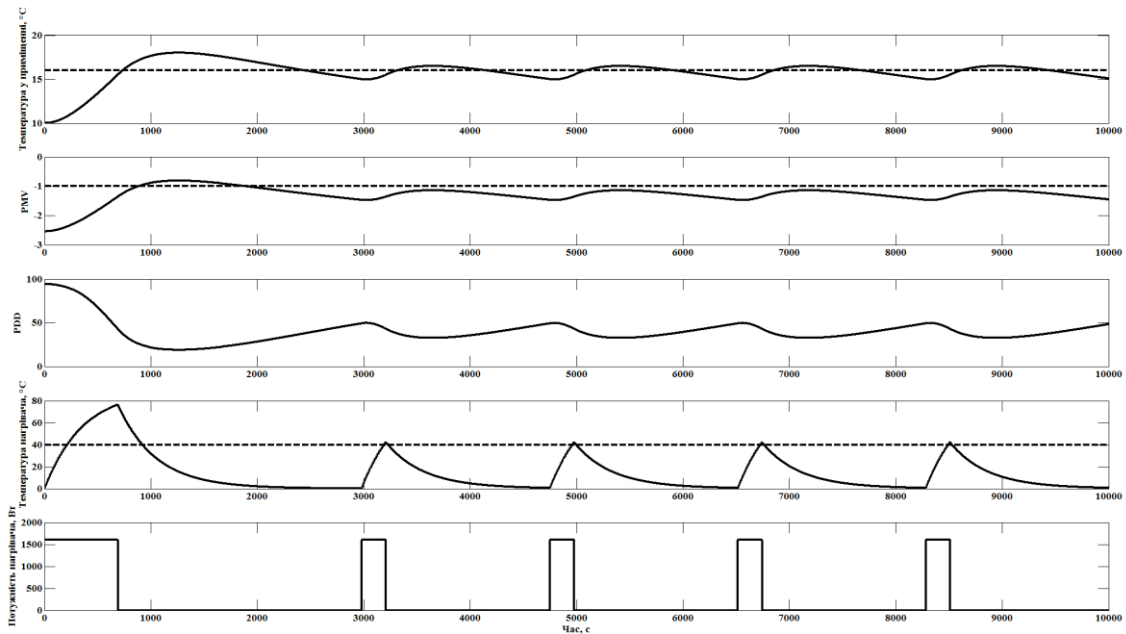


Рисунок 2.6 – Результати моделювання процесу керування температурою у приміщенні

Згідно з отриманими даними, двопозиційний регулятор у режимі стабілізації забезпечує підтримку температури в межах  $15,0 \div 16,5$  °C, що відповідає умовам помірного теплового комфорту.

На основі розрахунків прогнозованої середньої оцінки PMV, значення знаходяться в діапазоні  $-1,47 \div -1,14$ , що відповідає суб'єктивному сприйняттю між "трохи прохолодно" (-1) та "прохолодно" (-2). Водночас, прогнозований відсоток незадоволених PDD становить  $32,6 \div 49,7$  %, що є прийнятним для умов енергоефективного опалення з допустимим рівнем дискомфорту.

Таким чином, отримана модель приміщення задовольняє поставлені вимоги щодо точності та адекватності відтворення процесу керування тепловим комфортом. Вона може бути використана як основа для синтезу систем автоматичного керування мікрокліматом у житлових та комерційних приміщеннях, а також для дослідження їх функціонування в умовах змінних зовнішніх впливів.

Аналіз температури нагрівача показує, що у режимі стабілізації вона не перевищує 40 °C, що дозволяє уникнути локального перегріву повітря поблизу нагрівального елемента. Це, своєю чергою, сприяє збереженню відносної вологості у приміщенні на стабільному рівні, без її значного зниження.

За потреби, регулювання вологості може бути реалізовано за допомогою лінійно-змінного впливу, який активується відповідно до стану обігрівача. Такий підхід дозволяє забезпечити більш точне керування мікрокліматом, враховуючи як температурні, так і гігromетричні параметри.

Подальший розвиток моделі передбачає інтеграцію підсистеми керування вологістю, що дозволить розширити функціональні можливості системи та забезпечити повноцінне керування тепловим комфортом відповідно до стандартів.

### **2.3 Розробка моделей збурень за тепловим комфортом**

Забезпечення оптимального теплового комфорту в приміщеннях є одним із пріоритетних завдань автоматизованих систем керування мікрокліматом (АСУ МК), що підтверджується у працях які використані в роботі. Параметри мікроклімату, зокрема температура повітря, відносна вологість, швидкість руху повітря та температура огорожувальних конструкцій, зазнають впливу збурюючих факторів різної фізичної природи, що ускладнює процес стабілізації теплового стану середовища [6].

Виявлення, класифікація та моделювання таких збурень є необхідною умовою для розробки адаптивних алгоритмів керування, здатних враховувати динаміку системи та забезпечувати енергоефективне функціонування ОВК-обладнання [14,18,57].

За характером впливу збурення умовно поділяються на три основні групи:

Зовнішні збурення. Ці збурення обумовлені змінами кліматичних умов та параметрів навколишнього середовища. Вони мають повільну динаміку та, як правило, добре прогнозуються. До них належать: температура зовнішнього повітря, інтенсивність сонячної радіації, швидкість вітру, вологість зовнішнього повітря [34].

Внутрішні збурення. Формуються внаслідок діяльності людей, роботи технологічного та побутового обладнання, а також непередбачуваних змін у конфігурації приміщення. Ці збурення мають стохастичну природу та характеризуються високою варіативністю. Основні джерела: кількість людей у

приміщенні та їх теплонадходження, робота офісного або технологічного обладнання, відкривання дверей і вікон, локальні джерела тепла чи вологи .

Керовані збурення. Ця група охоплює впливи, що генеруються самою системою ОВК, і можуть бути використані як керуючі дії для компенсації зовнішніх та внутрішніх збурень. До них належать: зміна потужності опалювальних приладів, регулювання витрат повітря вентиляційною системою, робота кондиціонерів та інших елементів кліматичного обладнання.

Правильна класифікація збурень є критично важливою для побудови адаптивних та прогнозних алгоритмів керування, які забезпечують мінімізацію відхилень показників теплового комфорту, зокрема PMV (Predicted Mean Vote) та PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), відповідно до вимог ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 [34].

### **2.3.1 Модель зміни середньої температури випромінювання та відносної вологості у приміщенні**

Дослідження проводилися у контрольованому середовищі – типовому приміщенні розмірами:  $4 \text{ м} \times 3 \text{ м} \times 2,5 \text{ м}$ ,  $V = 30 \text{ м}^3$

Приміщення було просторово зоноване на: зону комфорту – область, де перебуває користувач; загальну зону – решта об'єму приміщення.

Система підтримки температури реалізована на базі центрального опалення, де нагрівальний елемент розміщено безпосередньо біля зони комфорту, що забезпечує локалізоване теплове навантаження.

Для реєстрації параметрів мікроклімату використовувалася дослідницька система, яка забезпечувала моніторинг у реальному часі таких величин:

Температура: зовнішнього повітря; на вході, виході та кінці нагрівача; у зоні комфорту; у загальній зоні.

Вологість: у зоні комфорту; у загальній зоні.

Атмосферний тиск: на рівні приміщення.

Аналіз вертикального перепаду температур між рівнем підлоги та стелі показав, що у межах обох зон він становить:  $\Delta T = 0,5 \div 1,0^\circ\text{C}$

Це свідчить про відносно рівномірний розподіл температури, що важливо для коректного розрахунку індексу PMV.

Основним джерелом охолодження у приміщенні є зовнішня стіна з віконним прорізом, що спричиняє локальні втрати тепла.

Джерела тепла у зоні комфорту включають: нагрівач системи опалення; внутрішні тепловиділення від людини та обладнання; можливі локальні джерела (освітлення, електроприлади).

Схематичне розміщення джерел тепла наведено на рисунку 2.7.

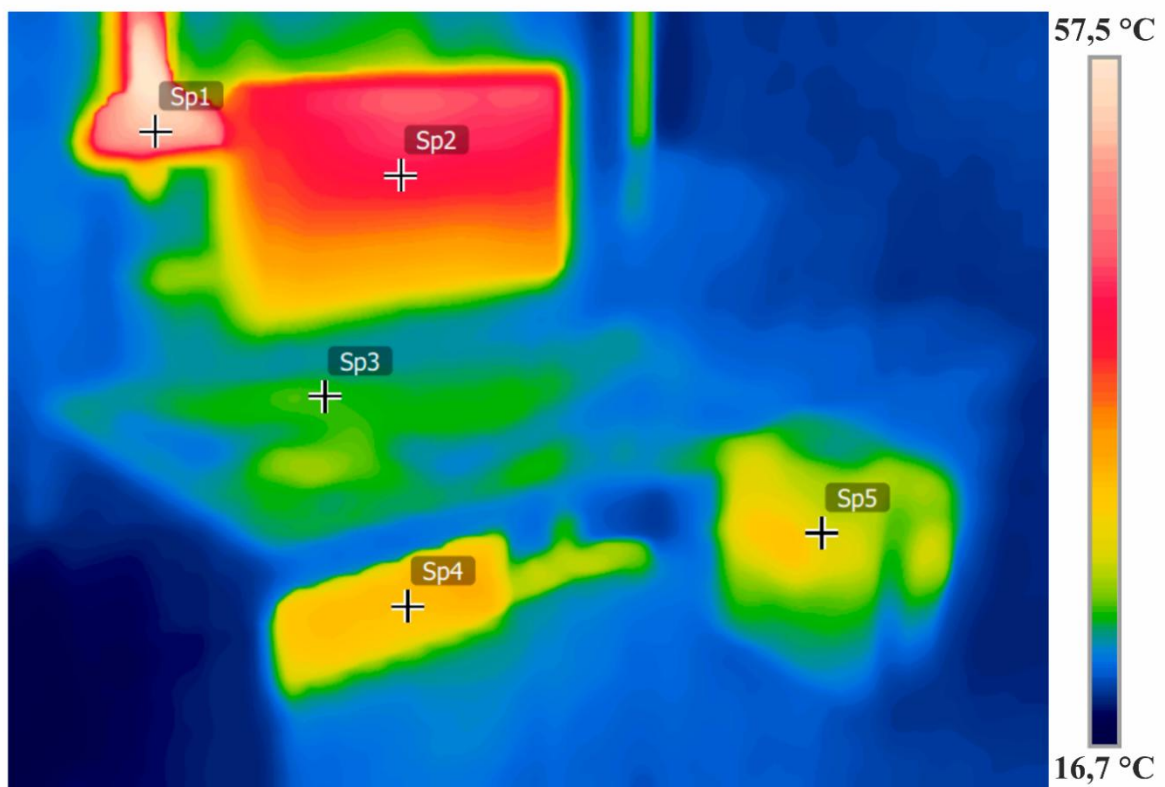


Рисунок 2.7 – Джерела тепла у зоні комфорту

Такий підхід до організації експериментального середовища дозволяє: забезпечити достовірність вимірювань; врахувати просторову неоднорідність мікроклімату; створити умови для оцінки ефективності системи керування тепловим комфортом.

У процесі дослідження було здійснено реєстрацію температурних показників у ключових точках системи опалення та контрольованого середовища. Вимірювання проводилися у п'яти контрольних точках:

- Sp1 – температура на виході нагрівача: 53,4 °C;

- Sp2 – температура на вході нагрівача: 43,7 °С;
- Sp3 – температура у зоні комфорту: 25,8 °С;
- Sp4 – температура у загальній зоні: 33,6 °С;
- Sp5 – температура на кінці нагрівача: 29,9 °С.

Протягом періоду дослідження зовнішня температура повітря коливалася в межах:

- Мінімальне значення: приблизно  $-15^{\circ}\text{C}$ ;
- Максимальне значення: приблизно  $+10^{\circ}\text{C}$ ;
- Середнє значення:  $-1,13^{\circ}\text{C}$ .

Такі умови забезпечили широкий температурний діапазон, що дозволяє дослідити: реакцію системи опалення на зміну зовнішніх кліматичних факторів; динаміку температурного розподілу в межах приміщення; вплив температури на показники теплового комфорту (PMV, PPD).

Вибраний інтервал часу охоплює як екстремальні холодні умови, так і помірні температури, що є критично важливим для верифікації ефективності алгоритмів керування мікрокліматом у різних режимах роботи.

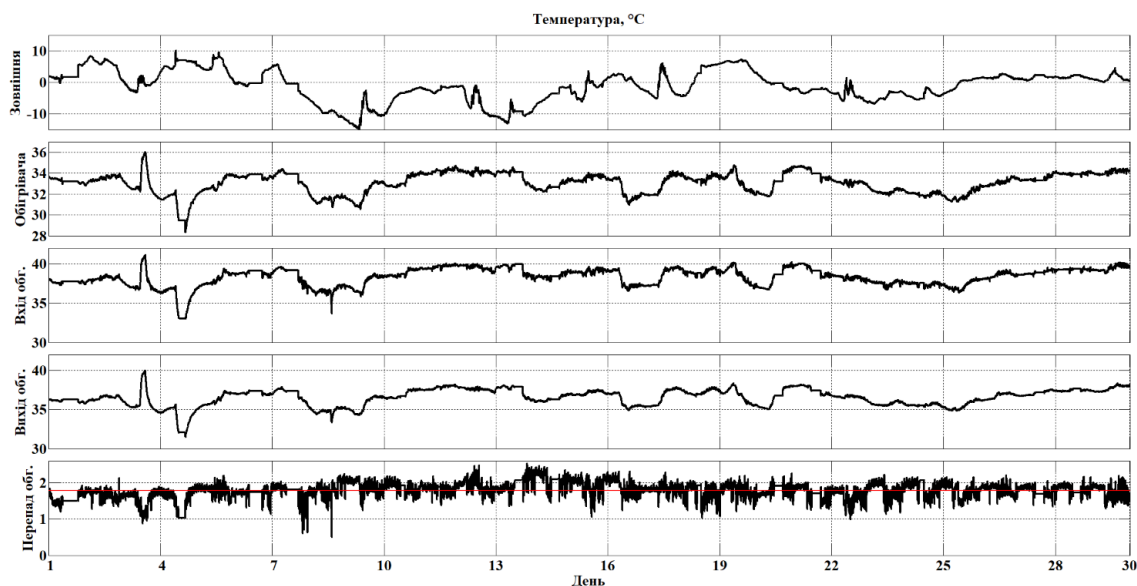


Рисунок 2.8 – Зміна температури нагрівача протягом місяця

На основі експериментальних даних встановлено, що середнє значення перепаду температури між входом та виходом нагрівального елемента системи опалення становить:  $\Delta T_{\text{обігрівач}} = +1,78^{\circ}\text{C}$

Це свідчить про стабільну роботу системи відповідно до температурного графіку, що забезпечує постійну потужність теплового потоку протягом усього періоду дослідження.

Температурний режим у приміщенні підтримувався в межах:  $T_{\text{зона комфорту}} \in [18^{\circ}\text{C}; 24^{\circ}\text{C}]$  що відповідає нормативним вимогам щодо теплового комфорту згідно з [58]. У той же час відносна вологість повітря становила:  $RH \in [25\%; 40\%]$  що дещо нижче за рекомендований нормативний діапазон 30–50 %, визначений санітарними нормами мікроклімату.

Після нормування даних температури та вологості було виконано кореляційний аналіз, який показав:

- У зоні комфорту: відповідність між температурою та вологістю – 89 %;
- У загальній зоні: відповідність – 96 %.

Це свідчить про високий ступінь кореляції, що дозволяє моделювати відносну вологість як функцію від температури з урахуванням масштабного коефіцієнта.

Фізично зв'язок пояснюється зміною вологовмісту повітря: при зростанні температури – абсолютна кількість водяної пари зростає, але відносна вологість зменшується. При зниженні температури – вологовміст зменшується, а відносна вологість зростає.

Водночас, кількість водяної пари у повітрі залишається сталою до моменту досягнення точки роси, після чого відбувається конденсація.

Зважаючи на високий ступінь відповідності, для моделювання відносної вологості у межах дослідження застосовано метод віддзеркалення температурного графіка з відповідним масштабуванням. Такий підхід дозволяє спростити обчислення без втрати точності у межах допустимого діапазону.

Збуренням для вологості можуть виступати: нагрівальні прилади з високою температурою поверхонь та повітрообмін з зовнішнім середовищем, що змінює гігromетричні характеристики повітря.

Таким чином, можна говорити, що система опалення забезпечує стабільний температурний режим; вологість повітря тісно корелює з температурою;

моделювання вологості може бути реалізоване на основі температурного профілю; для точного керування мікрокліматом необхідно враховувати вплив теплових джерел та вентиляції на гігрометричні параметри.

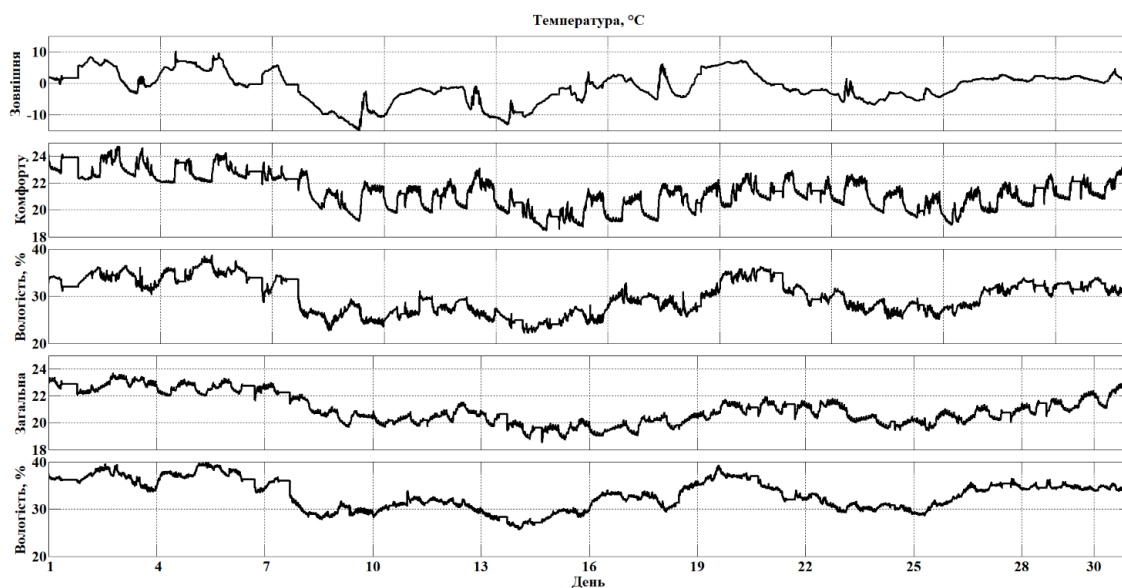


Рисунок 2.9 – Зміна температури у зоні комфорту та поза зоною протягом місяця

Аналіз експериментальних даних показав, що середня температура випромінювання у зоні комфорту змінюється залежно від стану електрообладнання:

У усталеному режимі при вимкненому електрообладнанні:  $T_{\text{випр.вимк}} = 25^{\circ}\text{C}$

При включеному електрообладнанні:  $T_{\text{випр.вкл}} = 30^{\circ}\text{C}$

Таблиця 2.1 – Динаміка нагріву та охолодження контрольних точок:

Точка	Час нагріву	Час охолодження
Sp1	15 хв	30 хв
Sp2	10 хв	30 хв

Встановлено, що динаміка зміни середньої температури випромінювання відповідає поведінці точки Sp1, яка є найбільш інерційною.

З урахуванням отриманих даних, процес зміни середньої температури випромінювання може бути описаний як система з перемиканням між двома аперіодичними ланками першого порядку. Перемикання між моделями здійснюється відповідно до стану електрообладнання (вкл/вимк), що дозволяє адекватно описати теплову інерцію системи.

$$W_H(s) = \frac{5}{180s+1}, \quad (9)$$

$$W_0(s) = \frac{5}{360s+1}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} \text{equipment}(t) > \text{equipment}(t-1), \text{choice}(t) = W_H(s), \\ \text{equipment}(t) < \text{equipment}(t-1), \text{choice}(t) = W_0(s), \\ \text{equipment}(t) = \text{equipment}(t-1), \text{choice}(t) = \text{choice}(t-1), \end{cases} \quad (11)$$

де  $W_H(s)$  – передавальна функція нагріву,  $W_0(s)$  – передавальна функція охолодження,  $\text{equipment}(t)$  – поточний стан електрообладнання,  $\text{equipment}(t-1)$  – попередній стан електрообладнання,  $\text{choice}(t)$  – поточна передавальна функція,  $\text{choice}(t-1)$  – попередня передавальна функція.

На основі експериментальних даних встановлено, що середня температура випромінювання у зоні комфорту змінюється залежно від стану електрообладнання:

У базовому режимі (вимкнене обладнання):  $T_{\text{випр.баз}} = 25^\circ\text{C}$ ;

У активному режимі (включене обладнання):  $T_{\text{випр.акт}} = 30^\circ\text{C}$ .

Зміна середньої температури випромінювання на  $5^\circ\text{C}$  моделюється за допомогою двох аперіодичних ланок першого порядку, що перемикаються залежно від стану електрообладнання:

Перемикання між моделями здійснюється дискретно, відповідно до включення/вимкнення електрообладнання, або його часткового навантаження.

До збурень середньої температури випромінювання належать: значні зміни температури теплоносія в системі опалення; додавання або виключення електрообладнання; зміна конфігурації джерел тепла.

Згідно з нормативами, середня температура випромінювання: не повинна перевищувати  $35^\circ\text{C}$ ; не може бути нижчою за температуру повітря у приміщенні.

Постійні часу моделі можуть бути адаптовані відповідно до теплової інерції конкретного обладнання, що дозволяє гнучко моделювати різні сценарії.

Відповідно до стандарту, нормативна відносна швидкість повітря у приміщенні становить:  $v \in [0,10; 0,15]$  м/с

Зміна швидкості може бути спричинена: відкриттям вікон або дверей; включенням вентиляційного обладнання; утворенням протягів.

Випробування показали, що відкриття вікна може призводити до збільшення швидкості повітря до:  $v_{\text{макс}} \in [0,3; 1,0]$  м/с.

Оскільки перехідні процеси при утворенні протягу мають дуже малу тривалість, зміну швидкості повітря доцільно моделювати як дискретну подію. При цьому необхідно враховувати збільшення повітрообміну та охолодження приміщення, що впливає на тепловий комфорт.

Для аналізу теплового комфорту у зоні комфорту були розраховані індекси PMV та PPD (рис. 2.10) відповідно до стандарту ISO 7730. Вихідні параметри:

Метаболічна активність:  $Met=1,2$ , met (сидяча робота)

Тип одягу:  $Clo=1,0$  (труси, сорочка, брюки, куртка, шкарпетки, черевики)

PMV: від  $-1$  до  $+1$ , середнє значення  $-0,1 \rightarrow$  "Нейтрально"

PPD: від  $5\%$  до  $20\%$ , середнє значення  $-7,0\%$

Система централізованого опалення у зоні комфорту забезпечує наближений до оптимального рівень теплового комфорту. Врахування динаміки середньої температури випромінювання, швидкості повітря та індивідуальних параметрів користувача дозволяє: підвищити точність моделювання PMV/PPD; адаптувати систему керування до реальних умов; забезпечити енергоефективне регулювання мікроклімату.

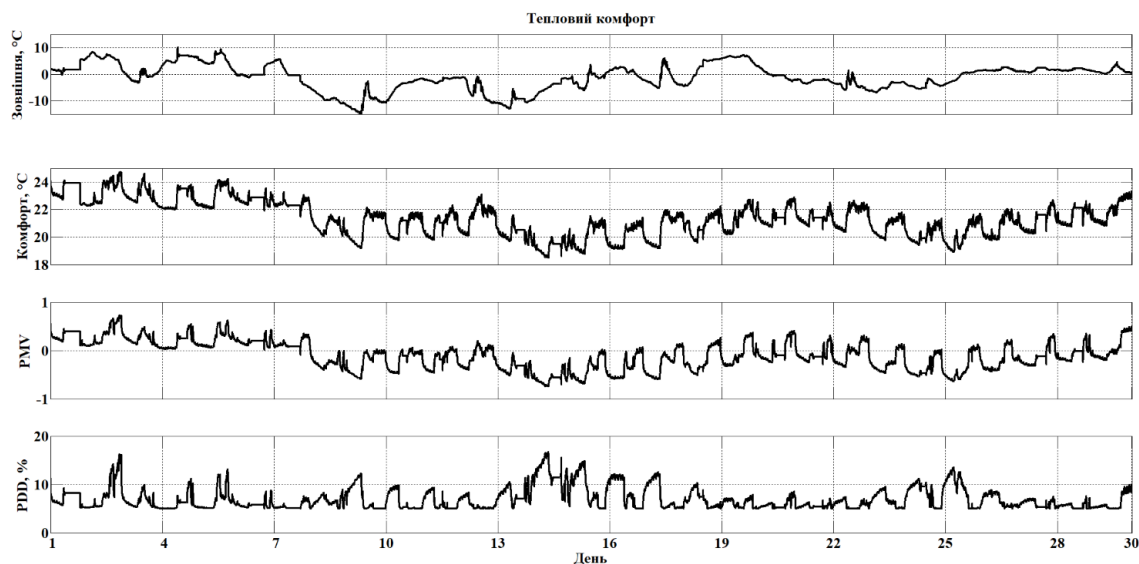


Рисунок 2.10 – Зміна параметрів теплового комфорту

Така модель дозволяє врахувати вплив внутрішніх джерел тепла на мікроклімат приміщення. Вона може бути інтегрована у систему керування тепловим комфортом, забезпечуючи динамічну адаптацію до змін енергетичного



На основі цих параметрів виконується розрахунок індексів теплового комфорту: PMV та PPD.

Для верифікації функціонування моделі було реалізовано замкнуту систему керування з використанням двопозиційного регулятора, уставка якого встановлена на рівні:  $T_{уст}=16^{\circ}\text{C}$

Це значення обрано відповідно до нормативних вимог, щодо допустимого температурного режиму у приміщеннях з помірною фізичною активністю.

Результати моделювання наведені на рисунку 2.12 та демонструють: Значення PMV наближається до рівня "Трохи прохолодно" (-1), що відповідає суб'єктивному сприйняттю температури як дещо нижчої за нейтральну. Значення PPD коливається біля 40 %, що свідчить про помірний рівень дискомфорту серед користувачів. Температура нагрівача не перевищує  $40^{\circ}\text{C}$ , що дозволяє підтримувати середню температуру випромінювання нижче нормативного порогу  $35^{\circ}\text{C}$ .

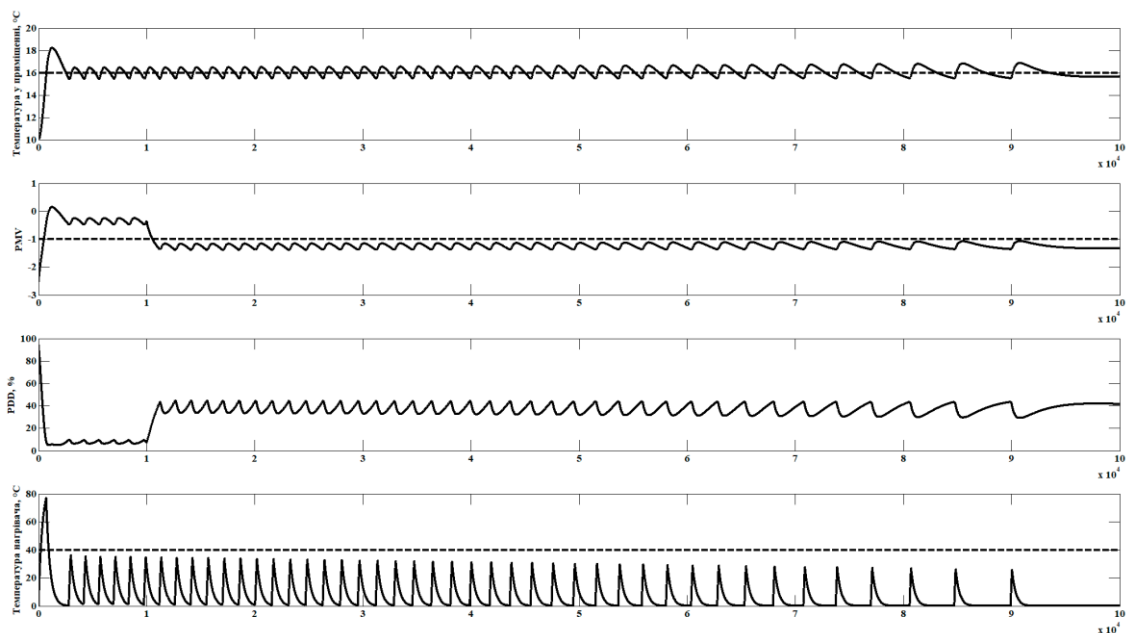


Рисунок 2.12 – Результат моделювання

Отримані результати підтверджують, що:

- Модель адекватно відтворює динаміку теплового комфорту з урахуванням багатофакторного впливу;
- Замкнута система керування з двопозиційним регулятором забезпечує стабільну роботу в межах заданої уставки;

- Індекси PMV та PPD можуть бути використані як основні критерії ефективності керування;
- Температурні обмеження нагрівача дозволяють уникнути перегріву поверхонь та надмірного зниження відносної вологості.

Таким чином, модель є придатною для подальшого використання у процесі синтезу регуляторів теплового комфорту, а також для оптимізації енерговитрат у системах ОВК.

## 2.5 Висновки

1. Було визначено структуру моделі системи опалення приміщення, яка охоплює основні компоненти та їх взаємозв'язки. Це дозволяє створити гнучку, масштабовану та енергоефективну систему, здатну підтримувати оптимальні параметри мікроклімату відповідно до вимог теплового комфорту. Чітке визначення структури моделі є основою для подальшого моделювання, аналізу та оптимізації роботи системи опалення.

2. Розроблено математичні моделі основних компонентів системи опалення – нагрівача, приміщення та датчика температури. Кожна з моделей виконує важливу роль у формуванні цілісної системи керування тепловим комфортом. Інтеграція цих моделей дає можливість створити основу для побудови ефективної автоматизованої системи опалення, здатної адаптуватися до змін зовнішніх умов, забезпечувати енергоефективність та підтримувати стабільний тепловий комфорт у приміщенні.

3. Розроблено математичну модель системи опалення приміщення, яка описує процеси теплообміну між джерелом тепла, конструктивними елементами будівлі та внутрішнім середовищем, що дозволяє кількісно оцінити зміну температури в приміщенні залежно від зовнішніх умов і режиму роботи системи, врахувати вплив теплоємності матеріалів, тепловтрат через огорожувальні конструкції та внутрішніх теплових надходжень, створити основу для оптимізації керування опаленням з урахуванням критеріїв енергоефективності та теплового комфорту.

4. Здійснено розробку моделей збурень, що впливають на тепловий комфорт у приміщенні. Моделювання цих факторів дозволяє: враховувати динамічний характер теплового балансу в приміщенні, прогнозувати вплив збурень на рівень комфорту, підвищити точність керування системою опалення, забезпечити адаптивність моделі до реальних умов експлуатації. Таким чином, моделі збурень є невід'ємною складовою комплексної системи.

5. Сформовано модель системи опалення приміщення, орієнтовану на забезпечення теплового комфорту людини. Розроблена модель є основою для подальшої реалізації інтелектуальної системи керування опаленням, що поєднує комфорт, ефективність і технологічну гнучкість.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ КОМФОРТОМ

#### 3.1 Дослідження можливості зниження енерговитрат за рахунок керування системою опалення на підставі теплового комфорту

Дослідження можливості зниження енерговитрат у системі опалення шляхом переходу від традиційного керування за температурою до керування на основі показників теплового комфорту було проведено з використанням удосконаленої математичної моделі приміщення, розробленої у попередніх розділах.

##### 3.1.1 Розробка моделі системи керування для дослідження можливості зниження енерговитрат

Структурна схема моделі, наведена на рисунку 3.1, відображає логічну побудову системи керування тепловим комфортом у приміщенні. Вона включає основні компоненти, що забезпечують моделювання теплових процесів та реалізацію алгоритмів керування.

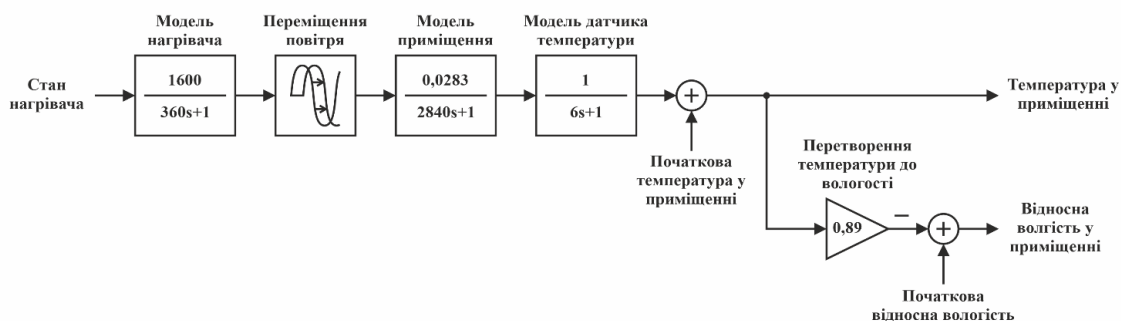


Рисунок 3.1 – Структурна схема удосконаленої моделі приміщення для дослідження процесу керування тепловим комфортом

Визначення показників теплового комфорту – прогнозованої середньої оцінки PMV та прогнозованого проценту невдоволених PPD – здійснювалося за допомогою програмної моделі, розробленої відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 7730:2005 [18].

Модель реалізує алгоритм розрахунку PMV/PPD на основі рівняння Фангерса, що враховує комплекс фізіологічних та мікрокліматичних параметрів. Її структура представлена на рисунку 3.2, де наведено вхідні та вихідні параметри.

Модель дозволяє проводити динамічний аналіз теплового комфорту в реальному часі, адаптуючи керуючі дії відповідно до змін середовища та індивідуальних характеристик користувача.



Рисунок 3.2 – Вхідні та вихідні параметри програмної моделі розрахунку параметрів теплового комфорту

З метою проведення порівняльного аналізу енерговитрат на опалення при використанні традиційного підходу (керування за температурою) та інтелектуального підходу (керування на основі комплексного показника теплового комфорту), було розроблено модель замкнутої системи керування температурою у приміщенні.

Модель побудована на основі удосконаленої математичної моделі приміщення, яка враховує: теплову інерцію конструкцій; динаміку середньої температури випромінювання; зміну відносної вологості; вплив внутрішніх джерел тепла та повітрообміну.

Структурна схема моделі замкнутої системи керування наведена на рисунку 3.3. Вона реалізує класичний підхід до регулювання температури за допомогою двопозиційного регулятора, який працює за принципом: увімкнення нагрівача, коли температура повітря нижча за уставку; вимкнення нагрівача, коли температура перевищує уставку. Уставка температури встановлена на рівні 16 °С, що відповідає нормативним вимогам для приміщень з помірною фізичною активністю.

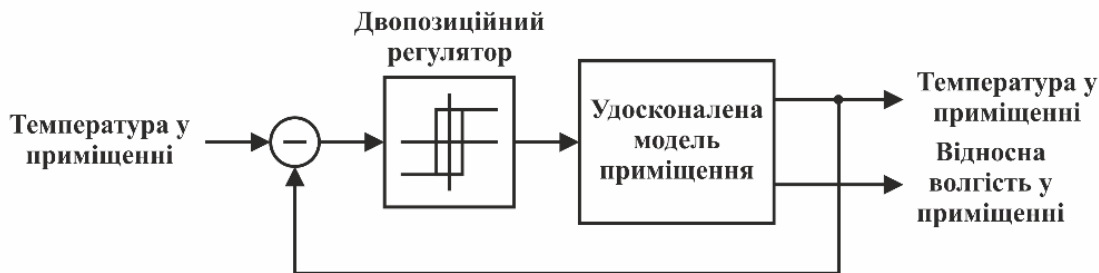


Рисунок 3.3 – Структурна схема моделі системи керування температурою у приміщенні на базі двопозиційного регулятора

На основі удосконаленої математичної моделі приміщення та програмної моделі розрахунку параметрів теплового комфорту, розроблено модель замкнутої системи керування тепловим комфортом у приміщенні. Система реалізована на базі двопозиційного регулятора, структурна схема якого наведена на рисунку 3.4.

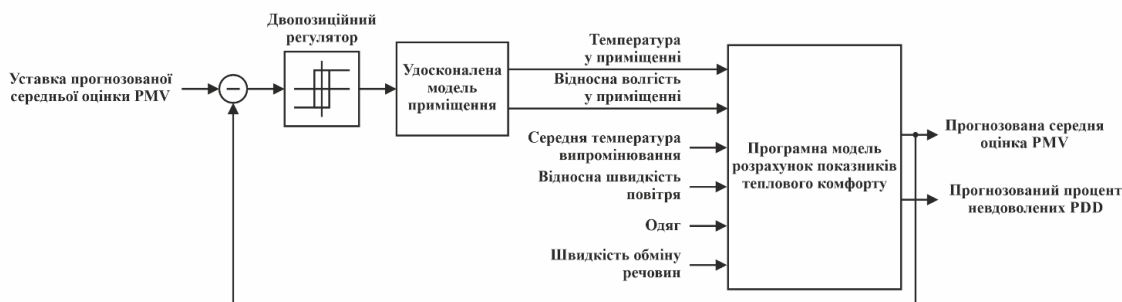


Рисунок 3.4 – Структурна схема моделі системи керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора

На основі цих моделей, у середовищі MATLAB/Simulink розроблено інтегровану модель замкнутої системи керування (рис 3.5), призначену для дослідження можливості зниження енерговитрат за рахунок регулювання системи опалення на основі індексу PMV.

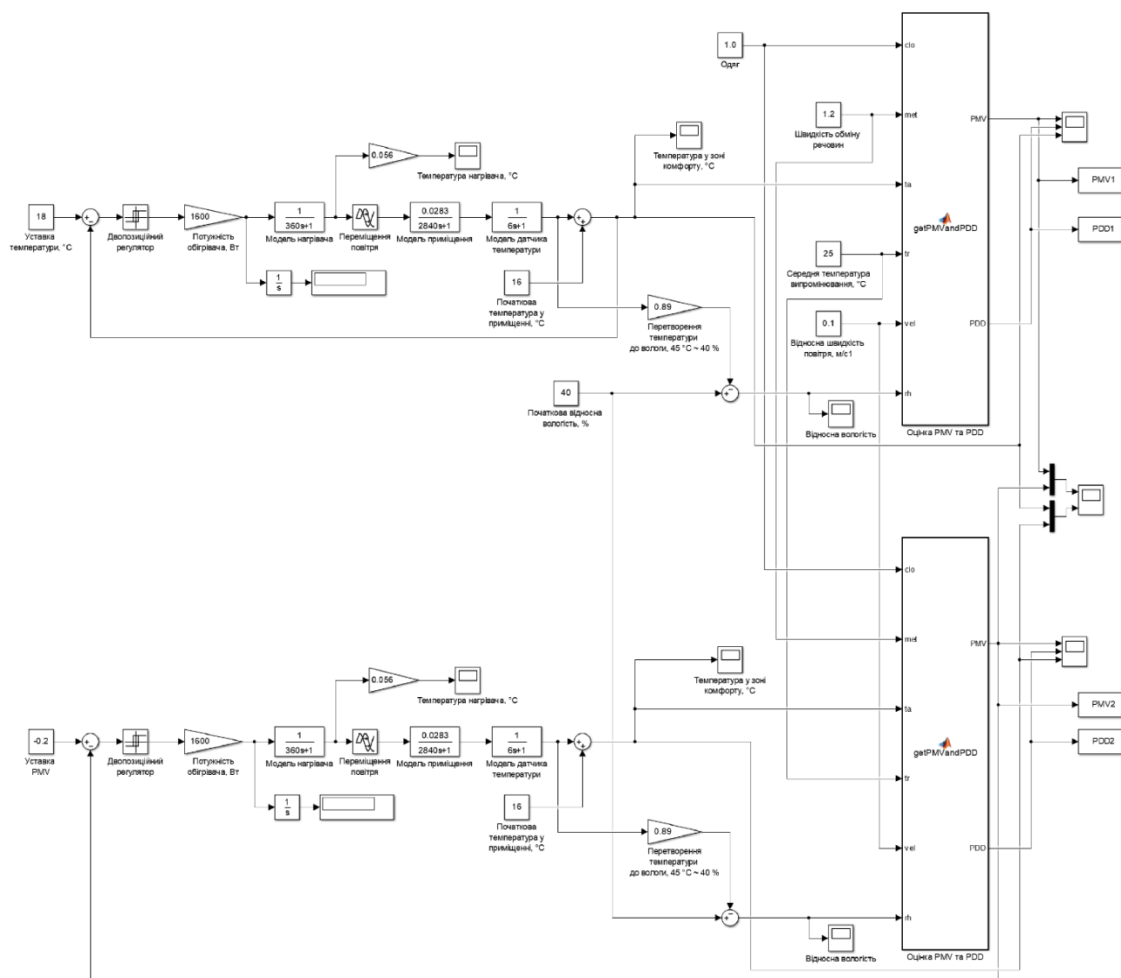


Рисунок 3.5 – Модель для дослідження можливості зниження енерговитрат за рахунок керування системою опалення на підставі теплового комфорту

Для проведення порівняльного аналізу ефективності двох підходів до керування опаленням – традиційного (за температурою) та інтелектуального (за показником теплового комфорту PMV) було використано інтегровану модель системи керування. Моделювання виконано у середовищі MATLAB/Simulink.

Початкові умови моделювання:

- Температура повітря: 16 °C (мінімально допустиме значення)
  - Уставка температури: 18 °C
  - Тип одягу: труси, сорочка, брюки, куртка, шкарпетки, черевики – 1,0 clo
- [12]
- Метаболічна активність: сидяча робота – 1,2 met
  - Середня температура випромінювання: 25 °C
  - Відносна швидкість повітря: 0,1 м/с

- Початкова відносна вологість: 40 %

На основі цих параметрів у якості уставки для системи керування тепловим комфортом обрано значення  $PMV = -0,2$ , що відповідає "нейтральному" тепловому самопочуттю згідно з класифікацією ISO 7730. Оцінка витраченої електроенергії виконана за інтегралом потужності значення якого приводиться до кВт·год.

Система керування опаленням за температурою налаштована таким чином щоб температура в усталеному режимі змінювалися у діапазон від 17 °С до 18 °С, рівень помилки включення нагрівача складає 1 °С, а виключення 0,85 °С. Система керування опаленням за тепловим комфортом налаштована на аналогічну зміну температури, рівень помилки включення нагрівача складає 0,096, а виключення 0,077.

Перевірка результатів моделювання (рис. 3.6). Середньоквадратичне відхилення між температурним режимом і PMV-профілем становить 96 %, що свідчить про високу відповідність між двома системами. Розбіжність у витратах електроенергії між системами становить:  $\Delta E = 9575$  Дж = 2,66 Вт год, при загальних витратах:  $E_{\text{заг}} = 0,39$  кВт год.

Отримані результати підтверджують, що:

- Обидві системи забезпечують еквівалентне функціонування в заданому температурному діапазоні.
- Система керування за PMV дозволяє точніше адаптуватися до фізіологічних потреб користувача, зберігаючи енергоефективність.
- Різниця у витратах електроенергії є незначною, що свідчить про технічну доцільність впровадження регуляторів теплового комфорту в існуючі системи опалення.

Результати моделювання дозволяють сформулювати рекомендації щодо впровадження інтелектуальних регуляторів теплового комфорту у реальні об'єкти, з урахуванням технічних обмежень та нормативних вимог.

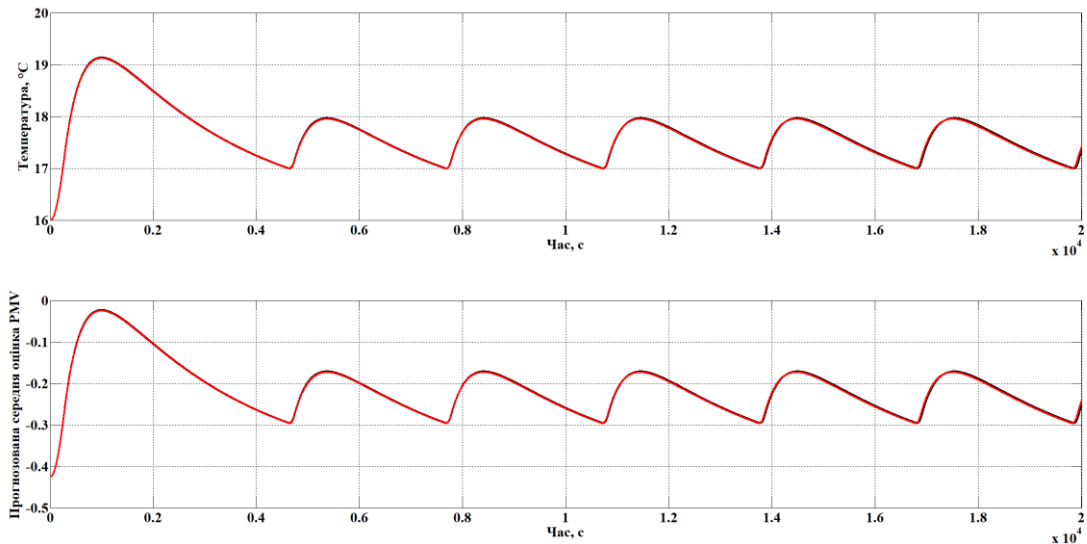


Рисунок 3.6 – Результат моделювання налаштованих систем

### 3.1.2 Методика дослідження регулюючої можливості зниження енерговитрат

З метою підвищення енергоефективності системи опалення запропоновано методику керування мікрокліматом приміщення на основі показників теплового комфорту, що дозволяє зменшити споживання енергії без погіршення умов перебування для користувачів.

Оцінити можливість зниження енерговитрат системи опалення шляхом переходу від традиційного керування за температурою повітря до керування на основі комплексного показника теплового комфорту – PMV.

Дослідження базується на порівнянні двох систем:

- Перша система – традиційна, що підтримує фіксовану температуру повітря незалежно від змін інших параметрів.
- Друга система – адаптивна, яка регулює мікроклімат на основі індексу PMV, враховуючи фізіологічні та мікрокліматичні змінні.

У межах досліджень варіювати такі вхідні параметри: Clo – термічний опір одягу (від 0,3 до 2,55), Met – метаболічна активність (від 0,8 до 2,0), Tr – середня температура випромінювання (від 16,0 °C до 35,0 °C), Vel – відносна швидкість повітря, Rh – відносна вологість.

Виконання ряду експериментів, згрупованих за типом змінного параметра: експерименти: вплив одягу (Clo), експерименти: вплив фізичної активності (Met), експерименти: вплив температури випромінювання (Tr), експерименти: вплив швидкості та вологості повітря (Vel, Rh).

Для кожного експерименту розраховувати: значення PMV та PDD, споживання електроенергії (E) обома системами.

Проводити аналіз витрат електроенергії:

– У випадках, коли параметри викликають дискомфорт (низьке Clo, низьке Met, низьке Tr), друга система активує опалення для досягнення комфортного PMV, що призводить до зростання енерговитрат;

– У випадках, коли параметри самі по собі забезпечують комфорт (високе Clo, високе Met, високе Tr), система не вмикає опалення, що дозволить зменшити витрати до нуля.

Розрахунок PMV/PPD здійснювати згідно з методикою ISO 7730:2005. Типи одягу та активності відповідали класифікації з [34]. Енергоспоживання моделювати на основі теплового балансу приміщення з урахуванням втрат та надходжень тепла.

Запропонована методика дозволяє:

– Виявити залежність енерговитрат від індивідуальних параметрів комфорту;

– Продемонструвати, що керування за PMV є більш гнучким і потенційно енергоефективним;

– Обґрунтувати необхідність впровадження обмежувального механізму, який гарантує, що витрати другої системи не перевищуватимуть витрати традиційної у найгіршому сценарії.

### **3.1.3 Дослідження регулюючої можливості зниження енерговитрат**

З метою оцінки можливості зниження енерговитрат у системі опалення було проведено дослідження, що базується на керуванні тепловим комфортом відповідно до нормативних вимог ISO 7730:2005 та ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 [18, 34].

Методологія дослідження передбачала варіювання вхідних параметрів, які впливають на розрахунок індексів PMV та PDD, у межах допустимих значень.

Результати дослідження наведені у таблиці 3.1, де Clo тип одягу, Met швидкість обміну речовин, Tr середня температура випромінювання, Vel відносна швидкість повітря, Rh початкове відносна волога, E кількість споживаної електроенергії, PMV середнє значення прогнозованої середньої оцінки, PDD середнє значення прогнозованого проценту невдоволених.

Таблиця 3.1 – Результати дослідження можливості зниження енерговитрат за рахунок керування системою опалення на підставі теплового комфорту

№	Clo	Met	Tr, °C	Vel, м/с	Rh, %	Керування температурою за			Керування за PMV		
						E, кВт·год.	PMV	PDD	E, кВт·год.	PMV	PDD
1	1,00	1,20	25,0	0,10	40,0	0,39	-0,23	6,13	0,39	-0,23	6,14
2	0,30	1,20	25,0	0,10	40,0	0,39	-1,99	76,34	2,28	-0,25	6,37
3	1,08	1,20	25,0	0,10	40,0	0,39	-0,12	5,31	0,09	-0,26	6,43
4	2,55	1,20	25,0	0,10	40,0	0,39	0,97	24,77	0,00	0,84	20,04
5	1,00	0,80	25,0	0,10	40,0	0,39	-1,98	75,62	2,47	-0,26	6,41
6	1,00	1,26	25,0	0,10	40,0	0,39	0,11	5,29	0,08	-0,26	6,44
7	1,00	2,00	25,0	0,10	40,0	0,39	0,77	17,66	0,00	0,65	13,86
8	1,00	1,20	16,0	0,10	40,0	0,39	-1,07	29,13	0,39	-0,26	6,41
9	1,00	1,20	26,3	0,10	40,0	0,39	-0,11	5,27	0,09	-0,26	6,42
10	1,00	1,20	35,0	0,10	40,0	0,39	0,75	16,88	0,00	0,55	11,29
11	1,00	1,20	25,0	0,10	40,0	0,39	-0,23	6,13	0,39	-0,23	6,14
12	1,00	1,20	25,0	0,30	40,0	0,39	-0,69	15,10	1,06	-0,24	6,19
13	1,00	1,20	25,0	0,10	20,0	0,39	-0,32	7,14	0,55	-0,23	6,14
14	1,00	1,20	25,0	0,10	60,0	0,39	-0,14	5,45	0,20	-0,23	6,16

У процесі дослідження встановлено, що система керування опаленням за температурою забезпечує підтримку температури повітря та витрат електроенергії на відносно постійному рівні, незалежно від змін таких параметрів, як: тип одягу користувача, характер виконуваної діяльності, середня температура випромінювання, відносна швидкість руху повітря, відносна вологість повітря.

Хоча останні три параметри можуть впливати на локальну температуру у приміщенні, система керування частково компенсує ці зміни за рахунок інерційності та теплової стабільності конструкцій. Проте, така компенсація не є достатньою для забезпечення індивідуального теплового комфорту.

Найбільш суттєвим недоліком традиційного підходу є те, що підтримка постійної температури повітря не гарантує досягнення теплового комфорту, оскільки: не враховуються індивідуальні фізіологічні параметри користувача; ігноруються динамічні зміни мікрокліматичних умов; не забезпечується адаптація до реального теплового сприйняття.

Як показано на рисунку 3.7, навіть при стабільній температурі у межах нормативу, значення PMV може виходити за межі комфортного діапазону, а PPD може перевищувати допустимий рівень, що свідчить про незадоволеність частини користувачів.

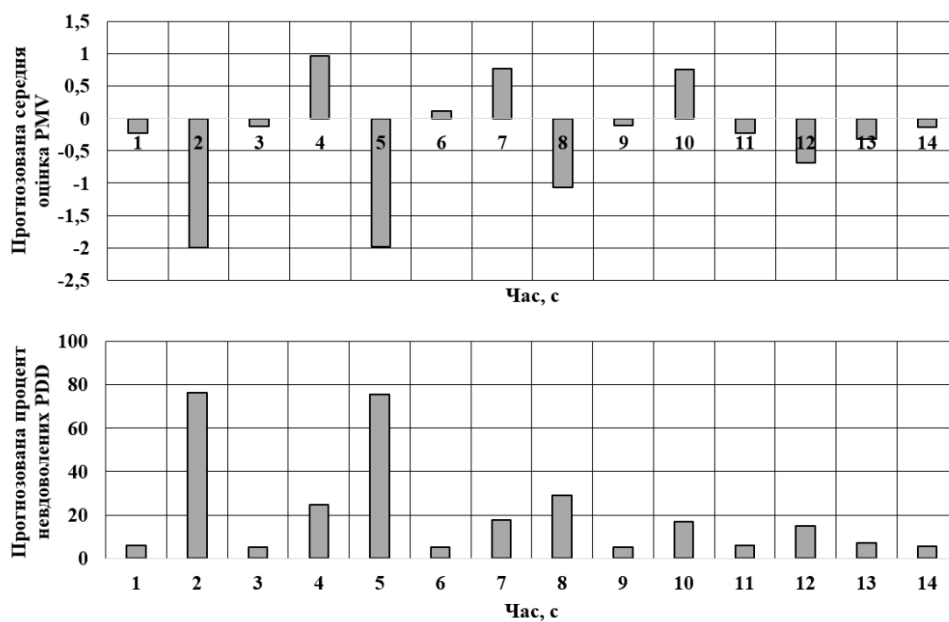


Рисунок 3.7 – Параметри теплового комфорту сформовані системою керування температурою у приміщенні

У межах експериментів №2–4 було досліджено вплив термічного опору одягу (Clo) на енергоспоживання системи керування тепловим комфортом. Для моделювання використовувались типові комплекти одягу, класифіковані відповідно до стандарту [34].

При значенні Clo = 0,3, що відповідає легкому літньому одягу (труси, футболка, шорти, світлі шкарпетки, сандалі), за температури повітря 16 °C у приміщенні, користувач відчуває тепловий дискомфорт, класифікований як "прохолодно". Для компенсації цього стану система керування тепловим комфортом (далі – друга система) активується та забезпечує споживання електроенергії на рівні

2,28 кВт·год, що у 5,8 разів перевищує витрати системи керування за температурою (далі – перша система).

При збільшенні термічного опору до  $C_{lo} = 1,08$  (труси, панчохи, блузка, довга спідниця, піджак, туфлі), витрати другої системи зменшуються до 0,09 кВт·год, що свідчить про зменшення потреби в додатковому тепловому впливі.

При значенні  $C_{lo} = 2,55$ , що відповідає утепленому зимовому одягу (термобілизна, термопіджак, брюки, термокомбінезон, шкарпетки, взуття, шапка, рукавички), друга система не активується, оскільки тепловий комфорт досягається природним шляхом, і енергоспоживання дорівнює нулю.

Таким чином, діапазон зміни енерговитрат другої системи залежно від термічного опору одягу становить:  $E \in [0,00; 2,28]$  кВт год (див. табл. 2.5)

Отримані результати підтверджують, що індивідуальні фізіологічні параметри користувача, зокрема тип одягу, мають суттєвий вплив на ефективність роботи системи керування тепловим комфортом. Це обґрунтовує доцільність використання адаптивних алгоритмів, які враховують змінні параметри користувача для оптимізації енерговитрат.

У межах експериментів №5–7 було досліджено вплив рухливої активності людини, що визначається показником метаболічної активності (Met), на енергоспоживання системи керування тепловим комфортом (далі – друга система).

При значенні  $Met = 0,8$ , що відповідає напівлежачому положенню, теплопродукція організму є мінімальною, що зумовлює потребу в додатковому тепловому впливі. У цьому режимі друга система витрачає 2,47 кВт·год для забезпечення комфортних умов.

При збільшенні метаболічної активності до  $Met = 1,26$ , що відповідає сидячій роботі (офіс, домашні умови, навчальні заклади, лабораторії), енергоспоживання зменшується до 0,08 кВт·год, що свідчить про часткове самозабезпечення теплового балансу організму.

При подальшому зростанні активності до  $Met = 2,00$ , що відповідає середній фізичній активності (робота стоячи, механічна праця, торгівля), теплопродукція організму є достатньою для досягнення теплового комфорту без додаткового

теплового впливу. У цьому випадку система не активується, а енергоспоживання дорівнює нулю.

Отримані результати підтверджують, що метаболічна активність користувача є критичним фактором, який впливає на ефективність роботи системи керування тепловим комфортом. Зростання фізичної активності дозволяє зменшити або повністю уникнути енерговитрат.

У межах експериментів №8–10 було досліджено вплив зміни середньої температури випромінювання ( $T_r$ ) на енергоспоживання системи керування опаленням. Результати моделювання показали, що:

При  $T_r = 16,0\text{ }^\circ\text{C}$  витрати електроенергії для обох систем (традиційної та адаптивної) становлять  $0,39\text{ кВт}\cdot\text{год}$ , що свідчить про необхідність активного теплового впливу для досягнення комфортних умов.

При  $T_r = 26,3\text{ }^\circ\text{C}$  енергоспоживання адаптивної системи керування тепловим комфортом (далі – друга система) зменшується до  $0,09\text{ кВт}\cdot\text{год}$ , що обумовлено зниженням потреби в додатковому нагріванні.

При  $T_r \geq 35,0\text{ }^\circ\text{C}$  тепла дія навколишніх поверхонь є достатньою для забезпечення комфортного мікроклімату, тому система не активується, а витрати електроенергії дорівнюють нулю.

У рамках експериментів №10–14 досліджено вплив відносної швидкості руху повітря ( $Vel$ ) та відносної вологості ( $Rh$ ) на функціонування системи керування. Зважаючи на характер отриманих даних, ці експерименти не потребують окремого коментаря, оскільки результати є стабільними та узагальненими у відповідних таблицях.

Отримані результати підтверджують, що середня температура випромінювання є одним із ключових параметрів, що впливає на активацію системи опалення та обсяг енерговитрат. Зростання  $T_r$  дозволяє зменшити або повністю уникнути споживання енергії, що обґрунтовує доцільність її врахування у алгоритмах адаптивного керування тепловим комфортом.

Таблиця 3.2 – Діапазон зміни витрат електроенергії системи керування тепловим комфортом у приміщенні

	Clo	Met	Tr, °C	Vel, м/с	Rh, %
Е, кВт·год.	0,00÷2,28	0,00÷2,47	0,00÷0,39	0,39÷1,06	0,20÷0,55

На основі проведеного аналізу експериментальних даних встановлено, що система керування тепловим комфортом у приміщенні, яка використовує індекс PMV як зворотний зв'язок, має істотний вплив на обсяг витрачених енергоресурсів. На відміну від традиційної системи, що орієнтується виключно на підтримку температури повітря, адаптивна система: реагує на зміну фізіологічних та мікрокліматичних параметрів; в окремих випадках не активує опалення, якщо тепловий комфорт досягається природним шляхом; забезпечує гнучке регулювання, що дозволяє зменшити енерговитрати без втрати якості мікроклімату.

Використання PMV як дійсного значення зворотного зв'язку дозволяє формувати керуючі дії з урахуванням комплексного впливу температури, вологості, швидкості повітря, типу одягу та активності користувача. Це забезпечує персоналізоване керування мікрокліматом, що є більш ефективним у порівнянні з традиційними підходами.

Зважаючи на те, що в окремих сценаріях система керування тепловим комфортом може споживати більше енергії, ніж традиційна, виникає потреба у впровадженні механізму обмеження, який: контролює граничні витрати енергії; забезпечує баланс між комфортом і енергоефективністю; гарантує, що у найгіршому випадку енерговитрати не перевищуватимуть витрат традиційної системи.

Отримані результати підтверджують доцільність використання керування на основі PMV як перспективного підходу до оптимізації енерговитрат у системах опалення. Впровадження адаптивних алгоритмів з урахуванням фізіологічних параметрів користувача дозволяє підвищити ефективність системи, зберігаючи високий рівень теплового комфорту.

Регулююча можливість витратами енергетичних ресурсів – це інтегральна властивість системи керування мікрокліматом, яка відображає її здатність адаптивно

змінювати рівень енергоспоживання відповідно до змін зовнішніх умов, внутрішніх параметрів середовища та індивідуальних характеристик користувача, з метою забезпечення теплового комфорту при мінімально необхідних витратах енергії.

У межах даного дослідження регулююча можливість розглядається як функціональна характеристика системи, що визначає:

- Діапазон зміни енерговитрат залежно від вхідних параметрів (Clo, Met, Tr, Vel, Rh);
- Гнучкість системи у реагуванні на змінні умови без втрати комфорту;
- Ефективність алгоритму керування, здатних враховувати комплексні показники комфорту (PMV, PPD) замість лише температури.
- Енергетична ефективність – здатність системи досягати заданого рівня комфорту з мінімальними витратами енергії.
- Інформаційна інтеграція – можливість врахування прогнозу погоди, графіка присутності, типу діяльності користувача тощо.

Регулююча можливість може бути оцінена за діапазоном зміни енерговитрат:  $\Delta E = E_{\text{макс}} - E_{\text{мін}}$ , де:  $E_{\text{макс}}$  – максимальні витрати енергії при несприятливих умовах (низький Clo, низький Met, низьке Tr);  $E_{\text{мін}}$  – мінімальні або нульові витрати при сприятливих умовах (високий Clo, високий Met, високе Tr).

Також можна використовувати коефіцієнт регулюючої здатності:  $K_{\text{рег}} = E_{\text{мін}} / E_{\text{макс}}$ , де значення  $K_{\text{рег}} \rightarrow 0$  свідчить про високу здатність системи до енергозбереження.

Висока регулююча можливість: дозволяє оптимізувати роботу системи опалення/охолодження; забезпечує індивідуалізоване керування мікрокліматом; сприяє зниженню експлуатаційних витрат; відповідає сучасним вимогам енергоефективного будівництва та екологічної сталості.

Таким чином, регулююча можливість витратами енергетичних ресурсів є ключовим критерієм оцінки ефективності системи керування мікрокліматом. Її максимізація є стратегічним завданням при розробці інтелектуальних регуляторів теплового комфорту, здатних забезпечити баланс між комфортом користувача та енергозбереженням.

Дослідження процесу керування тепловим комфортом у приміщенні потребує визначення діапазонів зміни ключових параметрів, зокрема: прогнозованої середньої оцінки PMV, прогнозованого процента невдоволених PDD, споживаної потужності системи опалення, температури повітря у приміщенні.

Для отримання достовірних результатів у реальних умовах експлуатації необхідно забезпечити стабільне підтримання параметрів мікроклімату на заданому рівні протягом тривалого часу. Тривалість таких експериментів може становити десятки діб, що супроводжується значними витратами енергоресурсів, а також потребує спеціалізованого обладнання та контрольованого середовища.

З огляду на зазначені обмеження, більш ефективним підходом є проведення досліджень у всьому діапазоні налаштувань системи керування шляхом математичного моделювання, що дозволяє: варіювати вхідні параметри у широких межах, оцінювати динаміку системи без фізичних втручань, мінімізувати витрати часу та ресурсів, забезпечити повторюваність та масштабованість результатів.

### **3.2 Розробка системи керування тепловим комфортом**

Враховуючи вищезазначене, а також результати попередніх досліджень щодо можливості зниження енерговитрат за рахунок керування системою опалення на основі показників теплового комфорту, було розроблено структуру моделі системи керування тепловим комфортом у приміщенні.

Модель реалізована на базі двопозиційного регулятора, що дозволяє:

- формувати керуючі дії відповідно до відхилення PMV від заданої уставки;
- забезпечувати адаптивне регулювання температури повітря;
- оцінювати енерговитрати залежно від фізіологічного стану користувача та умов середовища.

Структурна схема моделі наведена на рисунку 3.8.



Рисунок 3.8 – Структурна схема моделі системи керування тепловим комфортом

Побудова системи керування тепловим комфортом на базі двопозиційного регулятора обумовлена технічними особливостями більшості сучасних побутових електрообігрівачів. Згідно з даними маркетингового аналізу, проведеного на основі асортименту інтернет-магазину «Розетка», серед 4773 зареєстрованих моделей масляних обігрівачів: лише 35 моделей мають програмне керування, 104 моделі оснащені вбудованим датчиком температури, безперервне керування потужністю реалізовано виключно у найдорожчих пристроях, вартість яких у 2–3 рази перевищує середню ринкову ціну та сягає 10000 грн.

Таким чином, двопозиційний режим роботи (ввімкнено/вимкнено) є найбільш поширеним у побутових умовах, що обґрунтовує доцільність використання двопозиційного регулятора як базового елемента моделі керування

При розробці моделі системи керування тепловим комфортом враховано необхідність обмеження споживання енергоресурсів. Для цього у структурі моделі реалізовано механізм контролю граничного значення PMV, який функціонує за наступним принципом.

Обмежуюче значення PMV розраховується на основі вхідних параметрів, що відповідають типовим умовам роботи традиційної системи керування температурою. Якщо дійсне значення  $PMV \geq$  обмежуючого, то у якості зворотного зв'язку використовується реальне значення PMV. Якщо  $PMV <$  обмежуючого, і це призводить до збільшення енергоспоживання порівняно з традиційною системою, то

у якості зворотного зв'язку використовується обмежуваче значення PMV, що забезпечує енергоспоживання на рівні традиційної системи.

Такий підхід дозволяє гарантувати енергетичну ефективність системи навіть у несприятливих умовах, зберігаючи при цьому прийнятний рівень теплового комфорту.

Відповідно до запропонованої структури (рис. 3.8), у графічному середовищі Simulink математичного пакету MATLAB розроблено модель замкнутої системи для дослідження регулюючих можливостей системи керування тепловим комфортом (рис. 3.9).

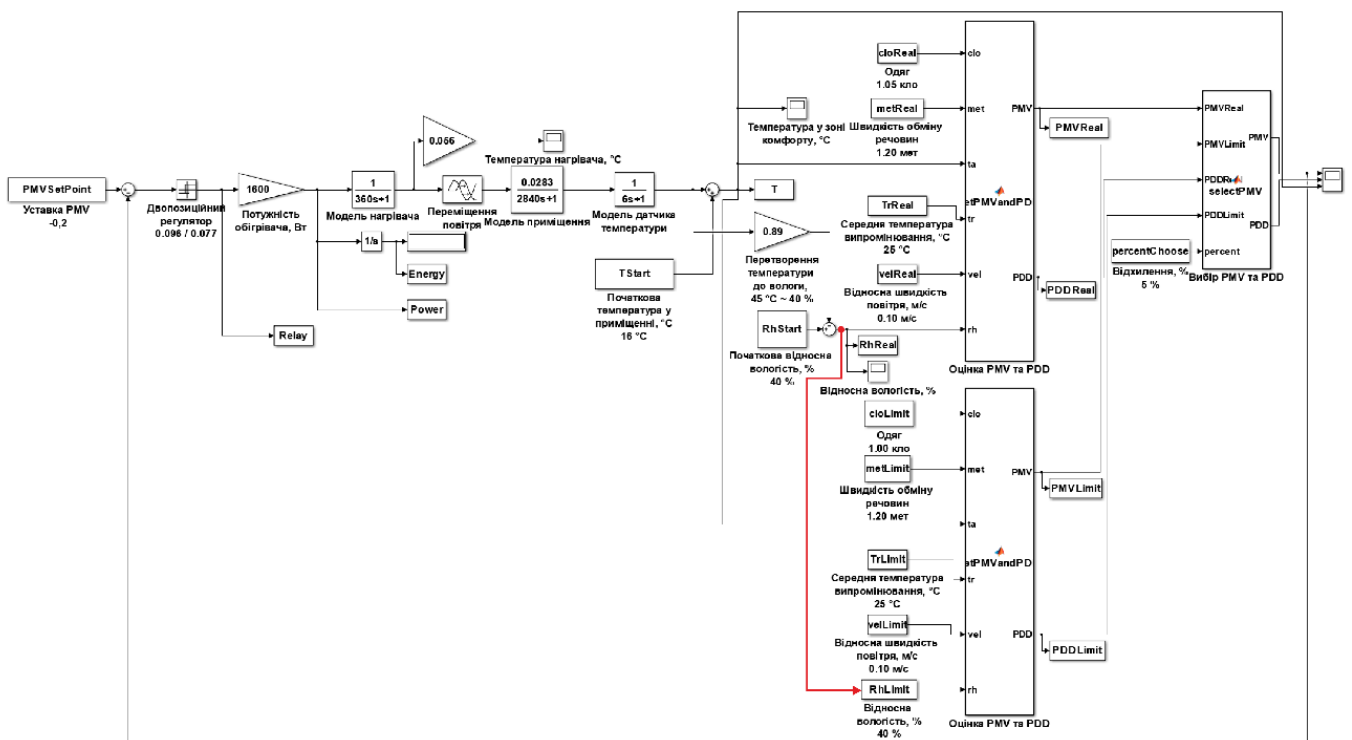


Рисунок 3.9 – Модель для дослідження регулюючих можливостей системи керування тепловим комфортом

### 3.3 Дослідження регулюючих можливостей системи керування тепловим комфортом

Розроблена модель системи керування тепловим комфортом реалізована у середовищі MATLAB, що забезпечує інтерактивне завдання параметрів керування через робочий простір та автоматичне збереження результатів моделювання. Створене програмне забезпечення дозволило: автоматизувати процес моделювання

при змінних параметрах системи, систематизувати отримані дані, здійснювати побудову графіків для подальшого аналізу.

Загалом було проведено понад 500 моделювань, що еквівалентно 115 добам реального часу. Середній час одного моделювання становив приблизно 30 секунд, що свідчить про високу обчислювальну ефективність моделі.

Дослідження виконувалося шляхом варіювання параметрів системи керування, зокрема: типу одягу, швидкості обміну речовин, середньої температури випромінювання, відносної швидкості повітря, початкової відносної вологості повітря, початкової температури у приміщенні, відсотка допустимого відхилення, уставки прогнозованої середньої оцінки PMV.

У таблиці 3.3 наведено результати моделювання зміни типу одягу у діапазоні 0,30–2,00 сло. Для оптимізації обсягу таблиці та полегшення аналізу вилучено дані, які не мають суттєвого впливу на характер процесу керування.

Основні показники таблиці: PMV – середнє значення прогнозованої середньої оцінки теплового комфорту, PDD – середнє значення прогнозованого процента незадоволених,  $T_{\text{мін}}$  – мінімальна температура у приміщенні,  $T_{\text{макс}}$  – максимальна температура у приміщенні, E – спожита електроенергія,  $\Delta E$  – різниця між енерговитратами системи керування тепловим комфортом та традиційної системи.

Детальний аналіз діапазону 0,80–1,20 сло представлено на рисунку 3.10, що дозволяє оцінити чутливість системи до змін термічного опору одягу у межах, характерних для реальних умов експлуатації.

Таблиця 3.3 – Результати моделювання зміни типу одягу

№	Тип одягу, сло	PMV обмежений	PMV дійсний	PDD	$T_{\text{мін.}}$ , °C	$T_{\text{макс.}}$ , °C	E, кВт·год.	$\Delta E$ , кВт·год.
1	0,30	-0,23	-2,00	76,61	16,96	17,91	0,36	-0,03
2	0,90	-0,23	-0,39	8,25	16,96	17,91	0,36	-0,03
3	0,95	-0,14	-0,23	6,11	17,59	18,48	0,48	0,09
4	1,00	-0,22	-0,23	6,12	16,99	17,95	0,39	0,00
5	1,05	-0,30	-0,23	6,14	16,40	17,44	0,21	-0,18
6	1,10	-0,43	-0,27	6,55	16,00	16,00	0,00	-0,39
7	2,00	-0,43	0,58	12,03	16,00	16,00	0,00	-0,39

У процесі моделювання досліджено вплив термічного опору одягу ( $Clo$ ) на функціонування системи керування тепловим комфортом, зокрема на вибір зворотного зв'язку, рівень енерговитрат та відповідність прогнозованої оцінки PMV заданій уставці.

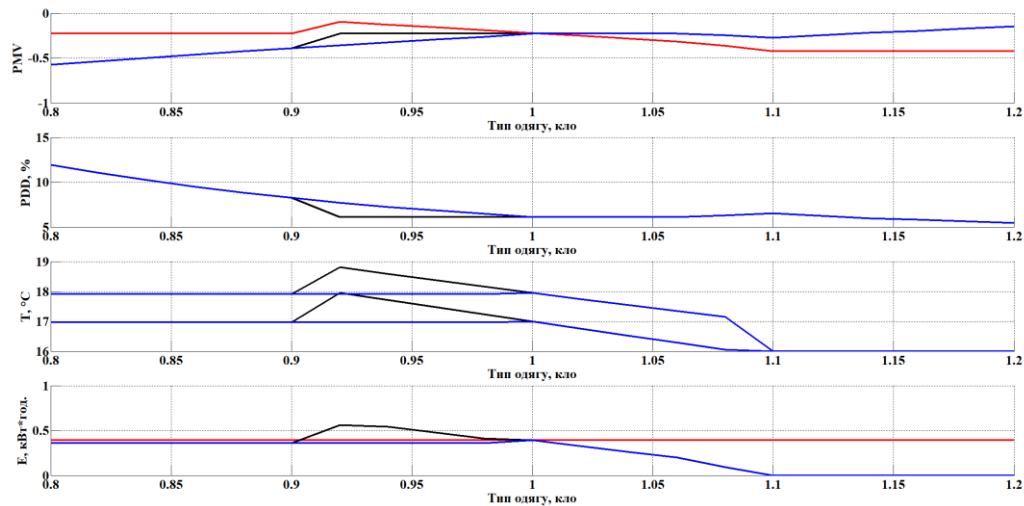
У діапазоні 0,30–0,90  $clo$  спостерігається розбіжність між дійсною прогнозованою оцінкою PMV та обмежувачим значенням, яка перевищує 5 % (відповідно до чорної та червоної характеристик на рис. 3.3). Це призводить до зростання енерговитрат порівняно з традиційною системою керування. З метою обмеження споживання енергоресурсів, система у цьому діапазоні використовує обмежене значення PMV як зворотний зв'язок.

У діапазоні 0,90–1,10  $clo$  система підтримує дійсне значення PMV на рівні уставки  $-0,2$ , відповідно до налаштувань двопозиційного регулятора. При цьому енергоспоживання не перевищує витрати традиційної системи, що свідчить про ефективність адаптивного керування у межах фізіологічно нейтрального одягу.

У діапазоні 1,10–2,00  $clo$  дійсне значення PMV перевищує уставку, що свідчить про перевищення рівня теплового комфорту. У цьому випадку опалення не активується, а енергоспоживання дорівнює нулю, що підтверджує здатність системи до саморегуляції в умовах надлишкового теплового захисту.

Зміна налаштування допустимого відхилення PMV з 5 % до 1 % (синя характеристика на рис. 3.3) дозволяє зменшити енерговитрати у діапазоні 0,90–1,00  $clo$  до рівня, еквівалентного традиційній системі. Це свідчить про високу чутливість системи до параметрів регулятора, а також про можливість тонкого налаштування режимів керування для досягнення балансу між комфортом і енергоефективністю.

Отримані результати підтверджують, що: термічний опір одягу є критичним фактором, що визначає режим роботи системи, вибір зворотного зв'язку (дійсне чи обмежене PMV) дозволяє контролювати енерговитрати, налаштування допустимого відхилення є дієвим інструментом оптимізації, система здатна адаптуватися до змін умов без втрати ефективності.



Чорна характеристика відповідає дійсній PMV при відхиленні 5 %;  
 синя характеристика відповідає дійсній PMV при відхиленні 1 %;  
 червона характеристика відповідає обмеженій PMV.

Рисунок 3.10 – Результат моделювання зміни типу одягу

У межах моделювання досліджено вплив швидкості обміну речовин (Met) на функціонування системи керування тепловим комфортом, зокрема на вибір зворотного зв'язку, рівень енерговитрат та відповідність прогнозованої оцінки PMV заданій уставці. Результати моделювання наведені у таблиці 3.4.

Значення параметра Met умовно поділено на три діапазони: 0,80–1,10 met – спостерігається збільшення енерговитрат порівняно з традиційною системою. Це зумовлено недостатньою теплопродукцією організму, що потребує додаткового теплового впливу. У цьому діапазоні система використовує обмежене значення PMV як зворотний зв'язок для обмеження енергоспоживання. 1,10–1,25 met – система відпрацьовує зміну параметра з метою підтримки заданої уставки PMV (–0,2). Енергоспоживання залишається на рівні або нижче традиційної системи, що свідчить про ефективність адаптивного керування. 1,25–2,20 met – теплопродукція організму є достатньою для досягнення комфортного стану без додаткового теплового впливу. У цьому діапазоні дійсне значення PMV перевищує уставку, опалення не активується, а енергоспоживання дорівнює нулю.

Детальний аналіз діапазону 1,00–1,30 met наведено на рисунку 3.11, що дозволяє оцінити чутливість системи до змін метаболічної активності у межах, характерних для реальних умов (сидяча робота, легка фізична активність).

Таблиця 3.4 – Результати моделювання зміни швидкості обміну речовин

№	Швидкість обміну речовин, мет	PMV обмежений	PMV дійсний	PDD	Тмін., °С	Тмакс., °С	Е, кВт·год.	ΔЕ, кВт·год.
1	0,80	-0,23	-1,86	69,93	16,96	17,91	0,36	-0,03
2	1,10	-0,23	-0,38	8,07	16,96	17,91	0,36	-0,03
3	1,15	-0,19	-0,23	6,10	17,24	18,17	0,41	0,02
4	1,20	-0,30	-0,23	6,14	16,40	17,44	0,21	-0,18
5	1,25	-0,43	-0,24	6,23	16,00	16,00	0,00	-0,39
6	2,00	-0,43	0,69	15,10	16,00	16,00	0,00	-0,39

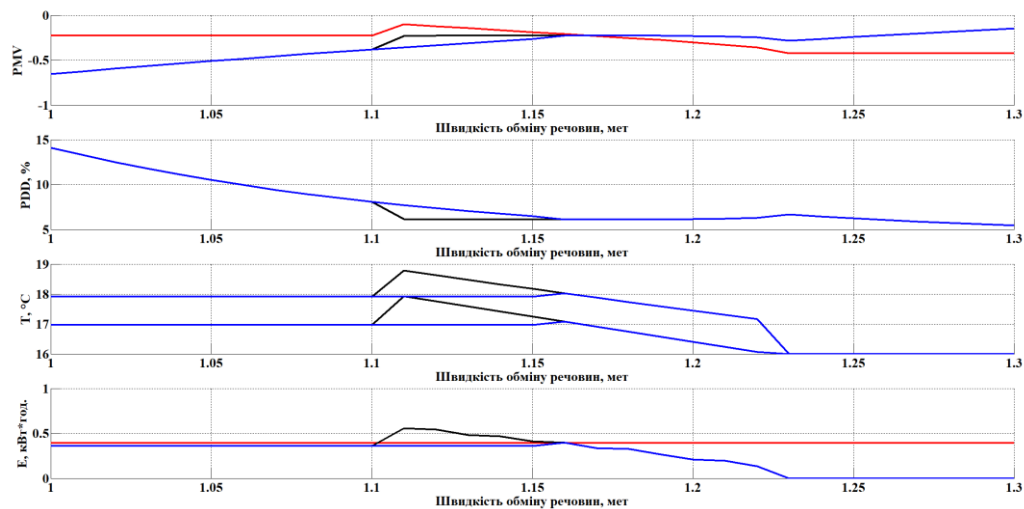


Рисунок 3.11 – Результат моделювання зміни швидкості обміну речовин

У межах моделювання досліджено вплив середньої температури випромінювання ( $T_r$ ) на функціонування системи керування тепловим комфортом, зокрема на вибір зворотного зв'язку, рівень енерговитрат та відповідність прогнозованої оцінки PMV заданій уставці. Результати моделювання наведені у таблиці 3.5.

Значення параметра  $T_r$  умовно поділено на три діапазони: 16–23 °С – спостерігається збільшення енерговитрат порівняно з традиційною системою. У цьому діапазоні тепла дія поверхонь є недостатньою для досягнення комфортного стану, тому система використовує обмежене значення PMV як зворотний зв'язок для контролю енергоспоживання. 23–25 °С – система відпрацьовує зміну параметра з метою підтримки заданої уставки PMV (-0,2). Енергоспоживання залишається на рівні або нижче традиційної системи, що свідчить про ефективність адаптивного керування у межах помірного теплового випромінювання. 25–35 °С – тепла дія

поверхонь є достатньою для забезпечення комфортного мікроклімату. У цьому діапазоні дійсне значення PMV перевищує уставку, опалення не активується, а енергоспоживання дорівнює нулю, що підтверджує здатність системи до саморегуляції в умовах надлишкового теплового випромінювання.

Детальний аналіз діапазону 21–27 °С наведено на рисунку 3.12, що дозволяє оцінити чутливість системи до змін  $T_r$  у межах, характерних для реальних умов експлуатації (вплив сонячного випромінювання, теплових поверхонь, обладнання тощо).

Таблиця 3.5 – Результати моделювання зміни середньої температури випромінювання

№	Середня температура випромінювання, °С	PMV обмежений	PMV дійсний	PDD	$T_{\text{мін.}}$ , °С	$T_{\text{макс.}}$ , °С	Е, кВт·год.	$\Delta E$ , кВт·год.
1	16,00	-0,23	-0,98	25,43	16,96	17,91	0,36	-0,03
2	22,00	-0,23	-0,44	9,09	16,96	17,91	0,36	-0,03
3	23,00	-0,10	-0,23	6,13	17,92	18,82	0,57	0,18
4	24,00	-0,20	-0,23	6,12	17,13	18,09	0,41	0,02
5	25,00	-0,30	-0,23	6,14	16,40	17,44	0,21	-0,18
6	26,00	-0,43	-0,26	6,35	16,00	16,00	0,00	-0,39
7	35,00	-0,43	0,60	12,53	16,00	16,00	0,00	-0,39

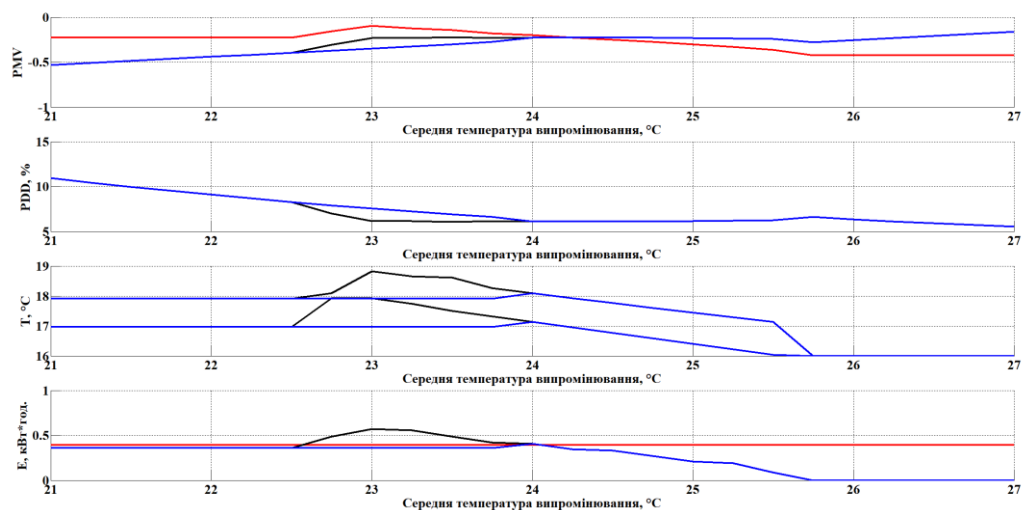


Рисунок 3.12 – Результат моделювання зміни середньої температури випромінювання

У процесі проведення дослідження удосконалена модель приміщення була використана без динамічної зміни середньої температури випромінювання. З цієї

метою вилучено відповідний структурний блок моделі, який забезпечує імітацію включення та виключення обладнання у приміщенні, що впливає на теплове випромінювання.

Такий підхід обумовлений тим, що всі показники у даному дослідженні визначаються в усталеному режимі, тобто після стабілізації параметрів мікроклімату. Відмова від моделювання динаміки випромінювання дозволила: зосередитися на аналізі впливу статичних значень  $T_r$  на процес керування, забезпечити більшу наочність при інтерпретації результатів, спростити структуру моделі, зменшивши кількість змінних та сценаріїв моделювання.

Статичне значення середньої температури випромінювання дозволяє ізолювати її вплив на прогнозовану оцінку PMV та енерговитрати, що є важливим для формування рекомендацій щодо оптимізації системи керування тепловим комфортом.

У межах моделювання досліджено вплив відносної швидкості руху повітря ( $Vel$ ) на функціонування системи керування тепловим комфортом, зокрема на відповідність прогнозованої оцінки PMV заданій уставці, вибір зворотного зв'язку та рівень енергоспоживання. Результати моделювання наведені у таблиці 3.6 та на рисунку 3.13.

Значення параметра  $Vel$  умовно поділено на три діапазони: 0,05–0,10 м/с – система забезпечує стабільне підтримання дійсного значення PMV, що свідчить про незначний вплив повітряного руху на теплове самопочуття користувача у цьому діапазоні. Енергоспоживання залишається на рівні традиційної системи або нижче. 0,10–0,15 м/с – система адаптивно реагує на зміну параметра, коригуючи керуючі дії для підтримки уставки PMV (–0,2). У цьому діапазоні спостерігається помірне навантаження на систему, що не призводить до перевищення енерговитрат. 0,15–0,30 м/с – зростання швидкості повітряного потоку викликає зниження теплового комфорту, що потребує додаткового теплового впливу. У цьому випадку система використовує обмежене значення PMV як зворотний зв'язок для контролю енерговитрат, які перевищують рівень традиційної системи.

Графічне представлення результатів у рисунку 3.13 дозволяє оцінити чутливість системи до змін  $V_{el}$  та візуалізувати межі ефективного керування.

Таблиця 3.6 – Результати моделювання зміни відносної швидкості повітря

№	Відносна швидкість повітря, м/с	PMV обмежени й	PMV дійсни й	PDD	Тмін., °С	Тмакс., °С	Е, кВт·год д.	ΔЕ, кВт·год.
1	0,05	-0,30	-0,23	6,15	16,46	17,49	0,26	-0,13
2	0,10	-0,30	-0,23	6,14	16,40	17,44	0,21	-0,18
3	0,15	-0,17	-0,23	6,14	17,37	18,33	0,48	0,09
4	0,20	-0,23	-0,41	8,59	16,96	17,91	0,36	-0,03
5	0,25	-0,23	-0,52	10,66	16,96	17,91	0,36	-0,03
6	0,30	-0,23	-0,61	12,75	16,96	17,91	0,36	-0,03

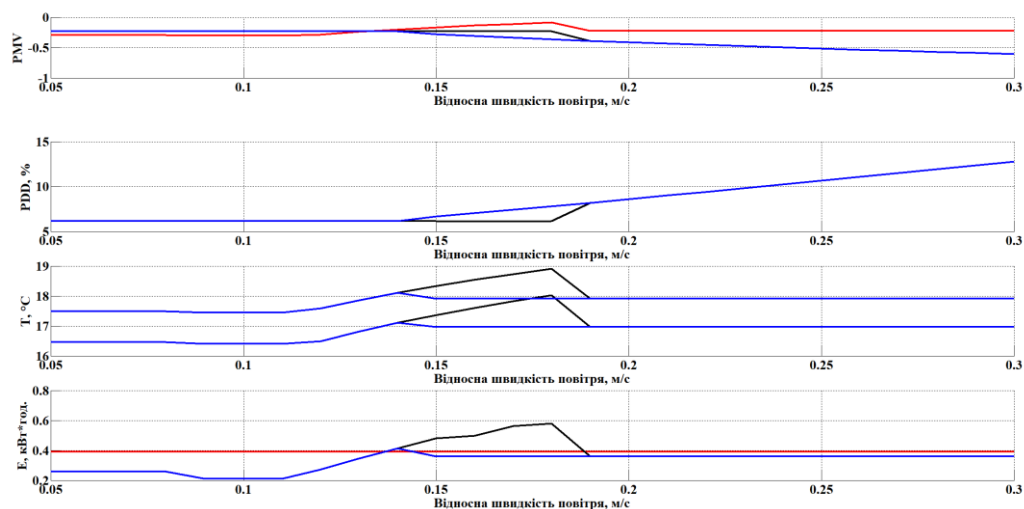


Рисунок 3.13 – Результат моделювання зміни відносної швидкості повітря

У межах моделювання досліджено вплив початкової відносної вологості повітря (RH) на функціонування системи керування тепловим комфортом, зокрема на відповідність прогнозованої оцінки PMV заданій уставці, вибір зворотного зв'язку та активацію опалення. Результати моделювання наведені на рисунку 3.14.

Зі збільшенням значення RH спостерігається зниження температури повітря, що призводить до зменшення обмеженого значення PMV. Це, у свою чергу, викликає розбіжність між дійсним та обмеженим значенням PMV, яка може досягати до 5%. У таких умовах система не застосовує обмеження, оскільки енерговитрати залишаються в межах допустимих.

Значення параметра RH умовно поділено на два діапазони: 20,0–54,0% – система адаптивно реагує на зміну вологості, коригуючи керуючі дії для підтримки

уставки PMV (-0,2). У цьому діапазоні забезпечується ефективне керування мікрокліматом без перевищення енерговитрат. 55,0–60,0 % – підвищена вологість сприяє досягненню теплового комфорту природним шляхом, без потреби в додатковому тепловому впливі. У цьому діапазоні опалення не активується, а енергоспоживання дорівнює нулю, що свідчить про саморегульовальну здатність системи.

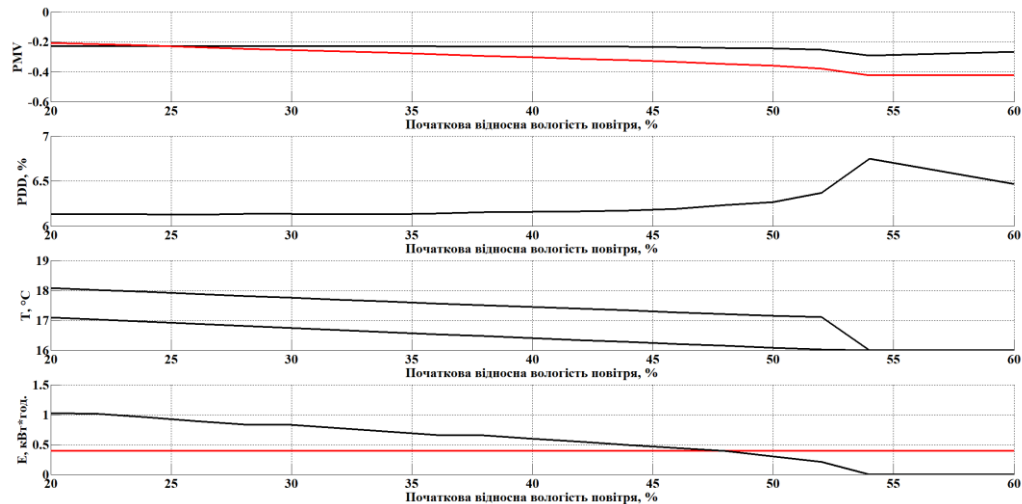


Рисунок 3.14 – Результат моделювання зміни початкової відносної вологості повітря

За результатами аналізу отриманих експериментальних даних встановлено, що для коректного розрахунку обмеженого значення прогнозованої середньої оцінки PMV необхідно враховувати поточне значення відносної вологості повітря (RH). Це дозволяє забезпечити ефективне обмеження витрат енергоресурсів у всьому діапазоні зміни даного параметра.

Виявлено, що збільшення RH супроводжується зниженням температури повітря, що, у свою чергу, призводить до зменшення обмеженого значення PMV. У таких умовах виникає розбіжність між дійсним та обмеженим значенням PMV, яка може досягати до 5 %. Це свідчить про втрату ефективності механізму обмеження, якщо RH не враховується при розрахунку.

З метою усунення цієї невідповідності до алгоритму моделі внесено зміни, що передбачають динамічне врахування RH при формуванні обмеженого значення PMV. Відповідна корекція алгоритму відображена на рисунках 3.8 та 3.9 (червона стрілка).

Результати моделювань з урахуванням запропонованих змін наведені на рисунку 3.15. Порівняння з попередніми моделями, що не враховували RH, показало високу відповідність.

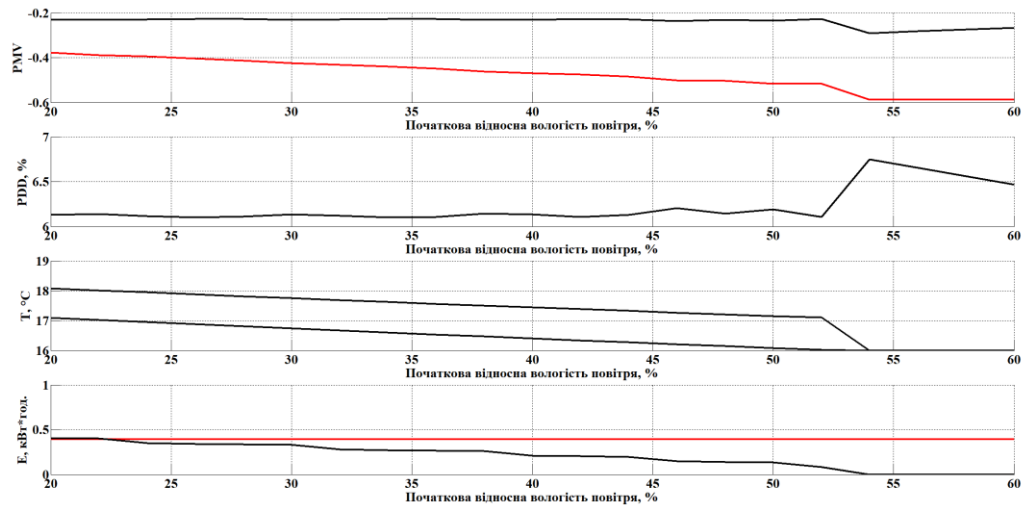


Рисунок 3.15 – Результат моделювання зміни початкової відносної вологості повітря з урахуванням при розрахунку обмеження PMV відносної вологості повітря

У межах моделювання досліджено вплив початкової температури повітря у приміщенні ( $T_0$ ) на функціонування системи керування тепловим комфортом, зокрема на відповідність прогнозованої оцінки PMV заданій уставці, активацію опалення та рівень енергоспоживання. Результати моделювання наведені у таблиці 3.7 та на рисунку 3.16.

Значення параметра  $T_0$  умовно поділено на два діапазони: 10,0–16,5 °C – у цьому діапазоні система активно реагує на зміну температури, забезпечуючи відпрацювання керуючих дій для досягнення заданої уставки PMV (–0,2). Відбувається активація опалення, що супроводжується відповідними енерговитратами. Це свідчить про ефективність адаптивного керування у холодних умовах. 16,5–20,0 °C – при підвищенні початкової температури до зазначеного діапазону тепловий комфорт досягається природним шляхом, без потреби в додатковому тепловому впливі. У цьому випадку опалення не активується, а енергоспоживання дорівнює нулю, що свідчить про саморегульовальну здатність системи.

Графічне представлення результатів на рисунку 3.16 дозволяє візуалізувати межі ефективного керування та оцінити чутливість системи до змін початкової температури.

Таблиця 3.7 – Результати моделювання зміни початкової температури повітря

№	Початкова температура повітря, °С	PMV обмежений	PMV дійсний	PDD	Тмін., °С	Тмакс., °С	Е, кВт·год.	ΔЕ, кВт·год.
1	10,00	-0,30	-0,25	6,30	16,51	17,28	1,58	-0,24
2	10,50	-0,30	-0,25	6,28	16,50	17,28	1,45	-0,25
3	11,00	-0,30	-0,25	6,27	16,50	17,27	1,34	-0,25
4	11,50	-0,30	-0,24	6,26	16,49	17,27	1,27	-0,22
5	12,00	-0,30	-0,24	6,24	16,48	17,27	1,15	-0,23
6	12,50	-0,30	-0,24	6,22	16,47	17,28	1,04	-0,24
7	13,00	-0,30	-0,24	6,20	16,47	17,28	0,93	-0,22
8	13,50	-0,30	-0,24	6,18	16,46	17,30	0,82	-0,23
9	14,00	-0,30	-0,23	6,16	16,45	17,31	0,72	-0,21
10	14,50	-0,30	-0,23	6,12	16,44	17,33	0,57	-0,27
11	15,00	-0,30	-0,23	6,11	16,43	17,36	0,48	-0,25
12	15,50	-0,30	-0,23	6,10	16,41	17,40	0,34	-0,27
13	16,00	-0,30	-0,23	6,14	16,40	17,44	0,21	-0,30
14	16,50	-0,36	-0,28	6,65	16,50	16,50	0,00	-0,41
15	20,00	0,10	0,16	5,53	20,00	20,00	0,00	-0,29

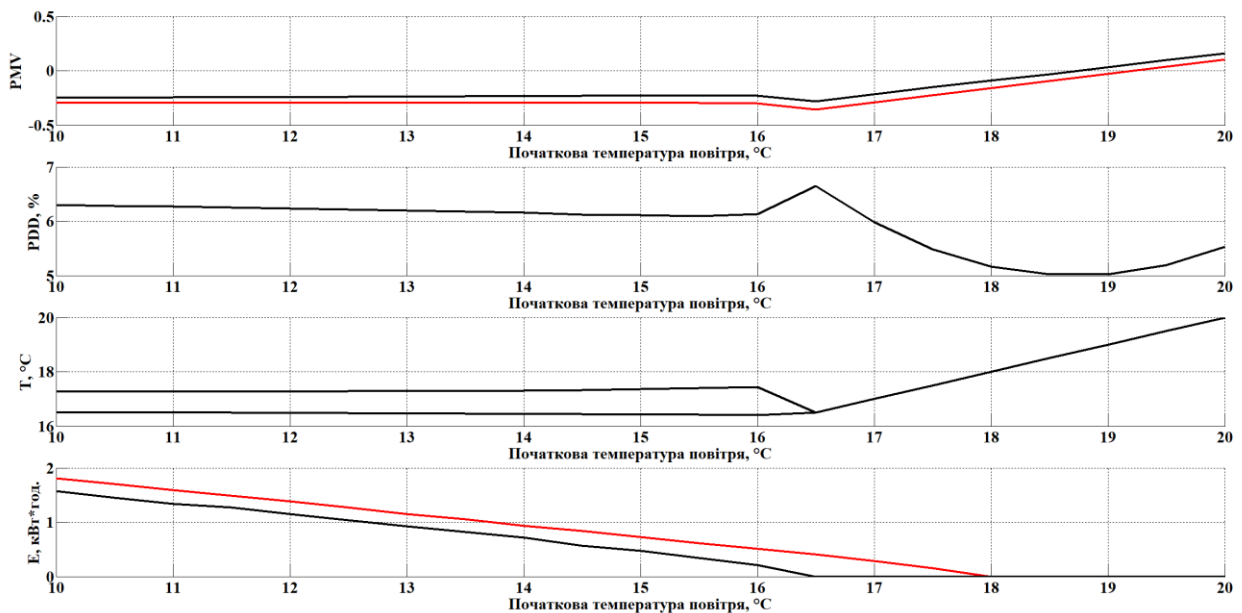


Рисунок 3.16 – Результат моделювання зміни початкової температури повітря

У межах моделювання досліджено вплив зміни уставки прогнозованої середньої оцінки PMV на функціонування системи керування тепловим комфортом,

зокрема на активацію опалення, енергоспоживання та відповідність дійсного значення PMV заданому рівню комфорту. Результати моделювання наведені у таблиці 3.8 та на рисунку 3.17.

Значення параметра уставки PMV умовно поділено на два діапазони:  $-1,0 \div -0,3$  – у цьому діапазоні система не активує опалення, оскільки заданий рівень комфорту відповідає холодному або прохолодному тепловому сприйняттю, що може бути досягнуто природним шляхом без додаткового теплового впливу. Енергоспоживання у цьому режимі дорівнює нулю, що свідчить про високу енергоефективність у відповідних умовах.  $0,3 \div 1,0$  – у цьому діапазоні система відпрацьовує зміну параметра, забезпечуючи активацію опалення для досягнення заданої уставки PMV. Відбувається регулювання теплового впливу, що супроводжується відповідними енерговитратами. Це свідчить про адаптивну здатність системи до підтримання комфортного мікроклімату при підвищених вимогах до теплового самопочуття.

Графічне представлення результатів на рисунку 3.17 дозволяє візуалізувати межі ефективного керування та оцінити чутливість системи до зміни уставки PMV.

Таблиця 3.8 – Результати моделювання зміни уставки прогнозованої середньої оцінки PMV

№	Уставка PMV	PMV обмежений	PMV дійсний	PDD	T <sub>мін.</sub> , °C	T <sub>макс.</sub> , °C	E, кВт·год.	ΔE, кВт·год.
1	-1,00	-0,43	-0,35	7,50	16,00	16,00	0,00	0,00
2	-0,30	-0,43	-0,35	7,50	16,00	16,00	0,00	0,00
3	-0,20	-0,30	-0,23	6,14	16,40	17,44	0,21	0,00
4	-0,10	-0,19	-0,13	5,36	17,19	18,15	0,41	0,00
5	0,00	-0,09	-0,04	5,05	17,99	18,89	0,58	0,00
6	0,10	0,02	0,06	5,11	18,85	19,70	0,76	0,00
7	0,20	0,13	0,16	5,59	19,67	20,50	0,96	0,00
8	0,30	0,22	0,25	6,37	20,43	21,30	1,13	0,00
9	0,40	0,33	0,35	7,59	21,37	22,22	1,34	-0,17
10	0,50	0,44	0,45	9,23	22,37	23,20	1,55	-0,14
11	0,60	0,54	0,55	11,26	23,29	24,12	1,73	-0,14
12	0,70	0,65	0,64	13,71	24,21	25,04	1,92	-0,10
13	0,80	0,76	0,74	16,48	25,14	25,97	2,12	-0,10
14	0,90	0,87	0,84	19,81	26,09	26,91	2,34	-0,09
15	1,00	0,98	0,94	23,61	26,92	27,84	2,58	-0,08

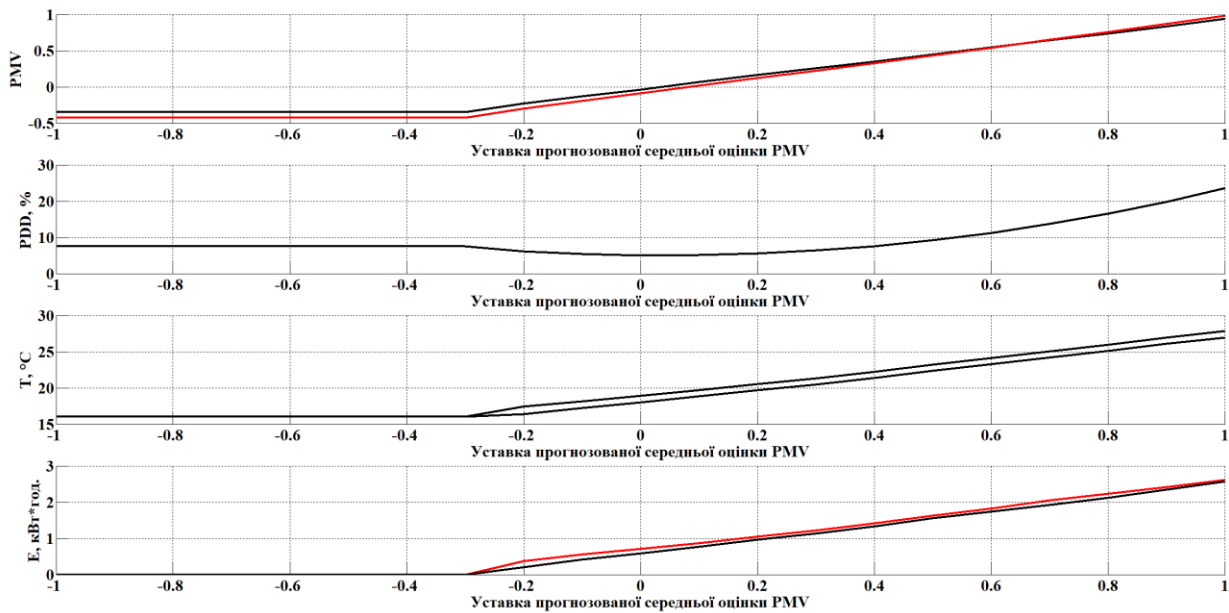


Рисунок 3.17 – Результат моделювання зміни уставки прогнозованої середньої оцінки PMV

У межах дослідження було проаналізовано вплив допустимого відсотка відхилення між дійсним значенням прогнозованої середньої оцінки PMV та її обмеженим значенням, що використовується як зворотний зв'язок у системі керування тепловим комфортом. Результати моделювання наведені у таблиці 3.9 та на рисунку 3.18.

Встановлено, що значення допустимого відхилення у діапазоні 0,50–4,00 % забезпечує енергоспоживання на рівні традиційної системи керування температурою, тобто без перевищення витрат енергоресурсів. Це свідчить про ефективність механізму обмеження, який дозволяє адаптувати керуючі дії без втрати теплового комфорту.

Характеристики, що відповідають відхиленню 1 %, для кожного з розглянутих параметрів (термічний опір одягу, метаболічна активність, середня температура випромінювання, відносна швидкість повітря) наведені на відповідних рисунках 3.3–3.6. Вони демонструють узгодженість результатів моделювання та підтверджують, що обране значення відхилення є оптимальним з точки зору балансу між комфортом і енергоефективністю.

Таблиця 3.9 – Результати моделювання зміни відхилення

№	Відхилення, %	Еclo, кВт·год.	Емет, кВт·год.	Еtr, кВт·год.	Еvel, кВт·год.
1	0,50	0,36	0,36	0,36	0,36
2	1,00	0,36	0,36	0,36	0,36
3	4,00	0,36	0,36	0,36	0,36
4	4,50	0,56	0,56	0,57	0,30
5	5,00	0,56	0,56	0,57	0,58
6	10,00	0,56	0,56	0,57	0,58

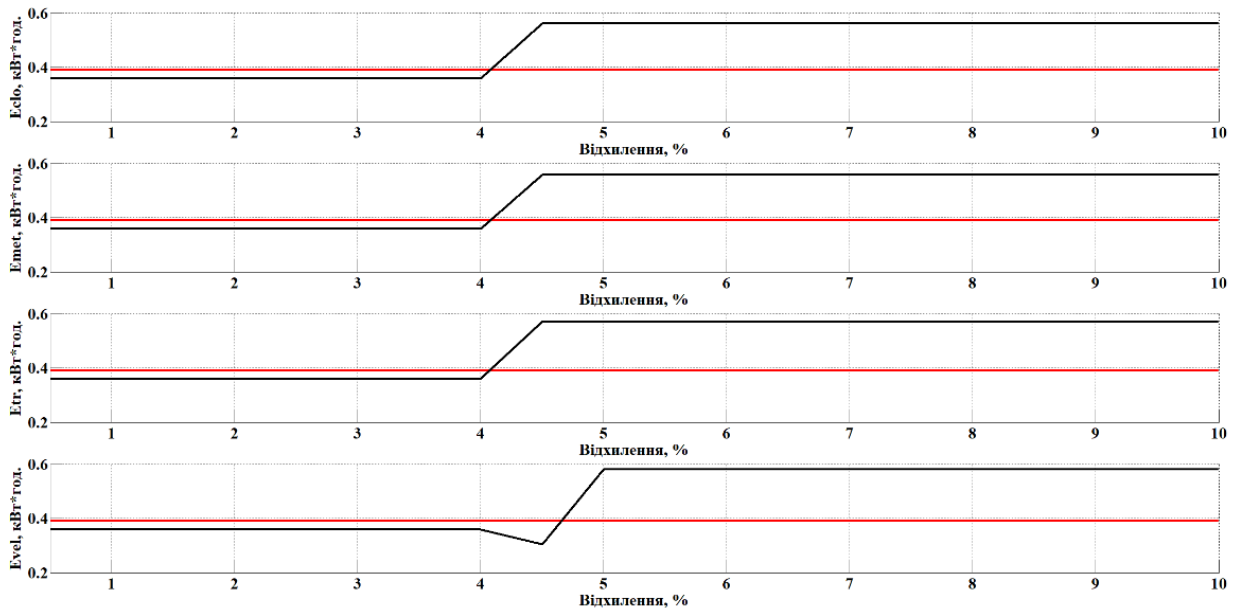


Рисунок 3.18 – Результати моделювання зміни відхилення

Для оцінки граничних можливостей розробленої системи керування тепловим комфортом було проведено моделювання за найскладніших умов, визначених відповідно до стандарту [34]. Установлені параметри моделювання: уставка PMV: 0,0 (нейтральне теплове самопочуття), тип одягу: 0,3 сло (легкий літній одяг), метаболічна активність: 0,8 met (напівлежачий стан), середня температура випромінювання: 10 °С, відносна швидкість повітря: 0,3 м/с, початкова температура повітря: 10 °С, відносна вологість повітря: 20 %.

Результати моделювання показали, що досягнення теплового комфорту виключно за рахунок роботи обігрівача є неможливим. Дійсне значення PMV виходить за межі допустимого інтервалу (+2 ÷ -2), що свідчить про некомфортні умови температура у приміщенні підтримується на рівні 19,6 °С, енерговитрати становлять 2,12 кВт·год. У таких умовах система переходить до керування за обмеженим значенням PMV, що дозволяє контролювати енерговитрати.

За результатами досліджень встановлено, що:

- Розроблена система керування тепловим комфортом на базі двопозиційного регулятора забезпечує стабільне підтримання заданої уставки PMV у нормальних умовах експлуатації.

- У випадках, коли досягнення теплового комфорту потребує підвищених енерговитрат порівняно з традиційною системою, система автоматично переходить до обмеження PMV, що дозволяє зберегти енергоефективність.

- Якщо дійсне значення PMV перевищує уставку, система деактивує опалення, відповідно до логіки роботи двопозиційного регулятора.

Таким чином, система забезпечує адаптивне керування тепловим комфортом, при якому рівень енерговитрат не перевищує, а у більшості випадків – нижчий, ніж у традиційних системах керування температурою.

### **3.4 Розробка системи керування тепловим комфортом з автоматичним налаштуванням**

На основі результатів дослідження процесу керування тепловим комфортом у приміщенні за допомогою двопозиційного регулятора, розроблено методику поетапного налаштування параметрів регулятора, яка забезпечує досягнення заданого рівня прогнозованої середньої оцінки PMV при мінімально необхідних енерговитратах.

На початку обираються параметри процесу керування:

1. Тип зсуву дійсного значення прогнозованої середньої оцінки PMV:

- нижче уставки – в усталеному режимі максимальне дійсне значення наближено до рівня уставки;

- на рівні уставки – в усталеному режимі середина коливань дійсного значення наближена до рівня уставки;

- вище уставки – в усталеному режимі мінімальне дійсне значення наближено до рівня уставки.

2. Значення уставки прогнозованої середньої оцінки  $PMV_{уст}$ :

- $-1,0 \div 0,0$  – прохолодно / трохи прохолодно;

- 0,0 – нейтрально;
- 0,0÷1,0 – трохи тепло / тепло.

3. Обмеження амплітуди коливань прогнозованої середньої оцінки в усталеному режимі  $\Delta PMV_{ур}$ .

4. Допустиме відхилення прогнозованої середньої оцінки від уставки в усталеному режимі  $\Delta PMV_{ур\_відх}$ .

5. Початковий рівень помилки керування за яким включається обігрівач  $\Delta PMV_{вкл\_об}$ .

6. Початковий рівень помилки керування за яким виключається обігрівач  $\Delta PMV_{викл\_об}$ .

Процес уточнення параметрів двопозиційного регулятора починається з очікування досягнення усталеного режиму:

7. Перше коливання виконується згідно з обраними значеннями уставки та початкових рівнів помилки керування відповідних включенню / виключенню обігрівача. За одне коливання вважається інтервал часу між двома включеннями нагрівача.

8. Друге коливання виконується аналогічно до першого при цьому визначається мінімальне  $PMV_{ур\_мін}$  та максимальне  $PMV_{ур\_макс}$  значення прогнозованої оцінки в усталеному режимі.

9. По закінченню другого коливання розраховуються уточнені параметри двопозиційного регулятора  $\Delta PMV_{вкл\_об}$ ,  $\Delta PMV_{викл\_об}$  для обраного типу зсуву. Пункти 8 та 9 повторюється доки не будуть виконані відповідні умови (1, 2; 1, 10; 1, 13). При виконанні усіх ітерацій після першої замість  $\Delta PMV_{вкл\_об}$ ,  $\Delta PMV_{викл\_об}$  використовуються уточнені параметри регулятора  $\Delta PMV_{вкл\_об}$ ,  $\Delta PMV_{викл\_об}$ .

9.1. Нижче уставки.

9.1.1. Перевіряється відповідність перехідного процесу в усталеному режимі до налаштувань:

– амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  менша або дорівнює налаштуванню:

$$(PMV_{УР\_МАКС} - PMV_{УР\_МИН}) \leq \Delta PMV_{УР}. \quad (1)$$

– максимальне значення прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  знаходиться на рівні уставки з урахуванням обмежень:

$$PMV_{УСТ} - \Delta PMV_{УР\_ВІДХ} \leq PMV_{УР\_МАКС} \leq PMV_{УСТ} + \Delta PMV_{УР\_ВІДХ}. \quad (2)$$

Якщо умови (1, 2) виконуються уточнення параметрів двопозиційного регулятора завершується.

9.1.2. У випадку коли амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  більша за налаштування:

$$(PMV_{УР\_МАКС} - PMV_{УР\_МИН}) > \Delta PMV_{УР}, \quad (3)$$

рівень помилки керування за яким виключається обігрівач збільшується:

$$\Delta PMV_{ВИКЛ\_ОБ} = \Delta PMV_{ВИКЛ\_ОБ} + \Delta PMV_{КРОК\_ОБ}, \quad (4)$$

крок зміни рівня помилки керування відповідає половині діапазону нечутливості двопозиційного регулятора:

$$\Delta PMV_{КРОК\_ОБ} = (\Delta PMV_{ВКЛ\_ОБ} - \Delta PMV_{ВИКЛ\_ОБ})/2, \quad (5)$$

поточна ітерація завершується.

9.1.3. У випадку коли максимальне значення прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  менше за значення уставки з урахуванням обмеження:

$$PMV_{УР\_МАКС} < PMV_{УСТ} - \Delta PMV_{УР\_ВІДХ}, \quad (6)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається униз:

$$\begin{aligned} \Delta PMV_{ВКЛ\_ОБ} &= \Delta PMV_{ВКЛ\_ОБ} - \Delta PMV_{КРОК\_ОБ}, \\ \Delta PMV_{ВИКЛ\_ОБ} &= \Delta PMV_{ВИКЛ\_ОБ} - \Delta PMV_{КРОК\_ОБ}, \end{aligned} \quad (7)$$

поточна ітерація завершується.

9.1.4. У випадку коли максимальне значення прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  більше за значення уставки з урахуванням обмеження:

$$PMV_{УР\_МАКС} > PMV_{УСТ} + \Delta PMV_{УР\_ВІДХ}, \quad (8)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається вгору:

$$\Delta PMV_{ВКЛ\_ОБ} = \Delta PMV_{ВКЛ\_ОБ} + \Delta PMV_{КРОК\_ОБ}, \quad (9)$$

$$\Delta PMV_{\text{ВИКЛ\_ОБ}} = \Delta PMV_{\text{ВИКЛ\_ОБ}} + \Delta PMV_{\text{КРОК\_ОБ}},$$

поточна ітерація завершується.

## 9.2. На рівні уставки.

9.2.1. Перевіряється відповідність перехідного процесу в усталеному режимі до налаштувань:

– амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  менша або дорівнює налаштуванню (1);

– максимальне значення прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  знаходиться вище уставки на половину діапазону його зміни:

$$\begin{aligned} PMV_{\text{УСТ}} - \Delta PMV_{\text{УР\_ВІДХ}} &\leq PMV_{\text{УР\_МАКС}} + (PMV_{\text{УР\_МІН}} - PMV_{\text{УР\_МАКС}})/2 \\ PMV_{\text{УР\_МАКС}} + (PMV_{\text{УР\_МІН}} - PMV_{\text{УР\_МАКС}})/2 &\leq PMV_{\text{УСТ}} + \Delta PMV_{\text{УР\_ВІДХ}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Якщо умови (1, 10) виконуються уточнення параметрів двопозиційного регулятора завершується.

9.2.1. Відповідає пункту 9.1.2.

9.2.3. У випадку коли максимальне значення прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  зсунуте відносно уставки на половину діапазону менше за її значення з урахуванням обмеження:

$$PMV_{\text{УР\_МАКС}} + (PMV_{\text{УР\_МІН}} - PMV_{\text{УР\_МАКС}})/2 < PMV_{\text{УСТ}} - \Delta PMV_{\text{УР\_ВІДХ}}, \quad (11)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається вниз (7), поточна ітерація завершується.

9.2.4. У випадку коли максимальне значення прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  зсунуте відносно уставки на половину діапазону більше за її значення з урахуванням обмеження:

$$PMV_{\text{УР\_МАКС}} + (PMV_{\text{УР\_МІН}} - PMV_{\text{УР\_МАКС}})/2 > PMV_{\text{УСТ}} + \Delta PMV_{\text{УР\_ВІДХ}}, \quad (12)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається вгору (9), поточна ітерація завершується.

## 9.3. Вище уставки.

9.3.1. Перевіряється відповідність перехідного процесу в усталеному режимі до налаштувань:

– амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  менша або дорівнює налаштуванню (1);

– мінімальне значення прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  знаходиться на рівні уставки з урахуванням обмежень:

$$PMV_{уст} - \Delta PMV_{ур\_відх} \leq PMV_{ур\_мін} \leq PMV_{уст} + \Delta PMV_{ур\_відх}. \quad (13)$$

Якщо умови (1, 13) виконуються уточнення параметрів двопозиційного регулятора завершується.

9.3.2. У випадку коли амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  більша за налаштування (3), рівень помилки керування за яким включається обігрівач зменшується:

$$\Delta PMV_{вкл\_об} = \Delta PMV_{вкл\_об} - \Delta PMV_{крок\_об}, \quad (14)$$

поточна ітерація завершується.

9.3.3. У випадку коли мінімальне значення прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  менше за значення уставки з урахуванням обмеження:

$$PMV_{ур\_мін} < PMV_{уст} - \Delta PMV_{ур\_відх}, \quad (15)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається униз (7), поточна ітерація завершується.

9.4.4. У випадку коли мінімальне значення прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  більше за значення уставки з урахуванням обмеження:

$$PMV_{ур\_мін} > PMV_{уст} + \Delta PMV_{ур\_відх}, \quad (16)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається вгору (9), поточна ітерація завершується.

Після виконання умов відповідності система переходить до нормального режиму функціонування з використанням уточнених параметрів регулятора. На основі пункту 9 розроблено алгоритм уточнення параметрів, графічна частина якого для типу зсуву «нижче уставки» наведена на рисунку 3.19.

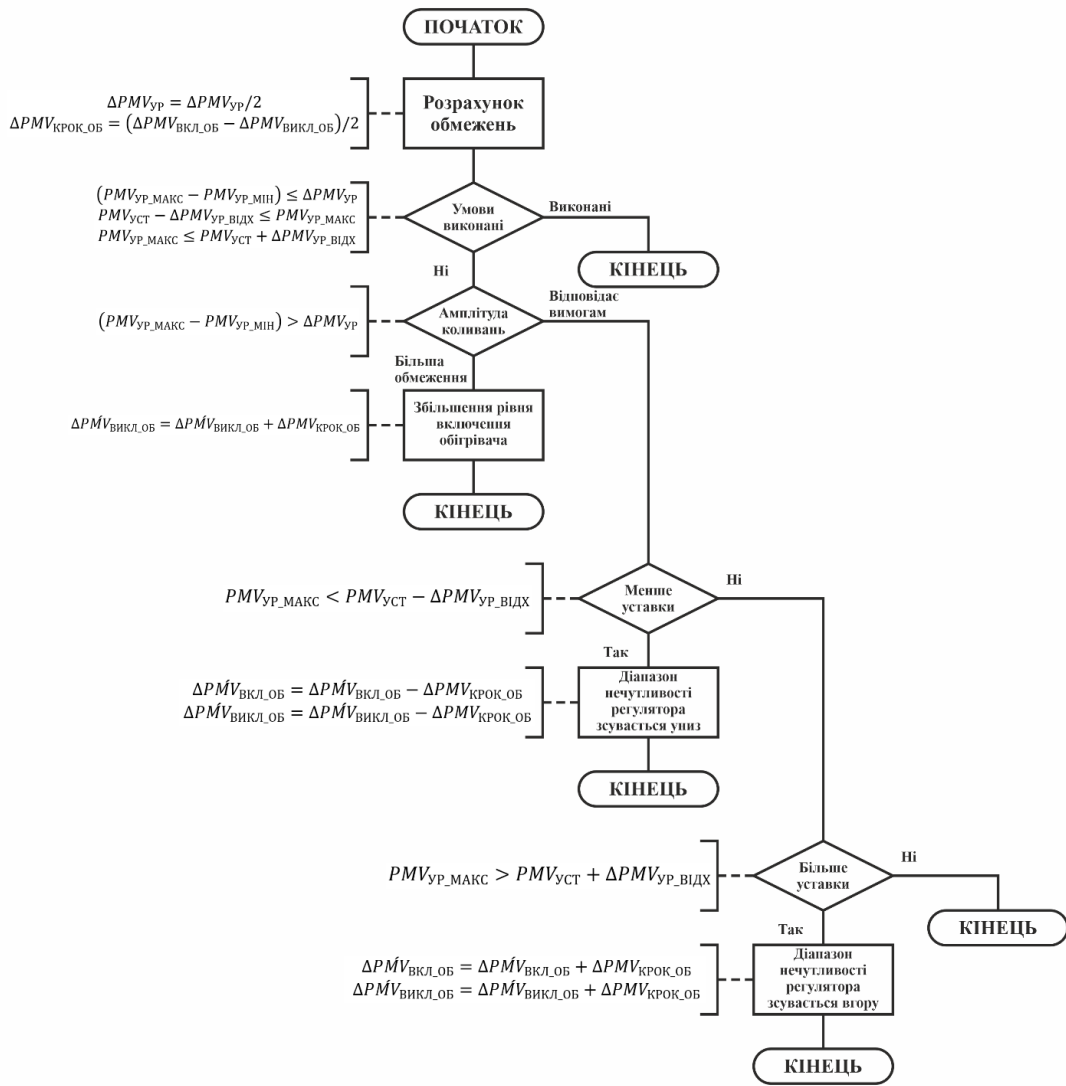


Рисунок 3.19 – Частина алгоритму уточнення параметрів двопозиційного регулятора відповідна до типу зсуву нижче уставки

Відповідно до запропонованої методики налаштування та алгоритму уточнення параметрів, розроблено двопозиційний регулятор, який забезпечує адаптивне керування тепловим комфортом у приміщенні з урахуванням прогнозованої середньої оцінки PMV.

Графічна схема взаємозв'язку вхідних та вихідних параметрів регулятора наведена на рисунку 3.20, що ілюструє логіку роботи системи у процесі уточнення та стабілізації керування.

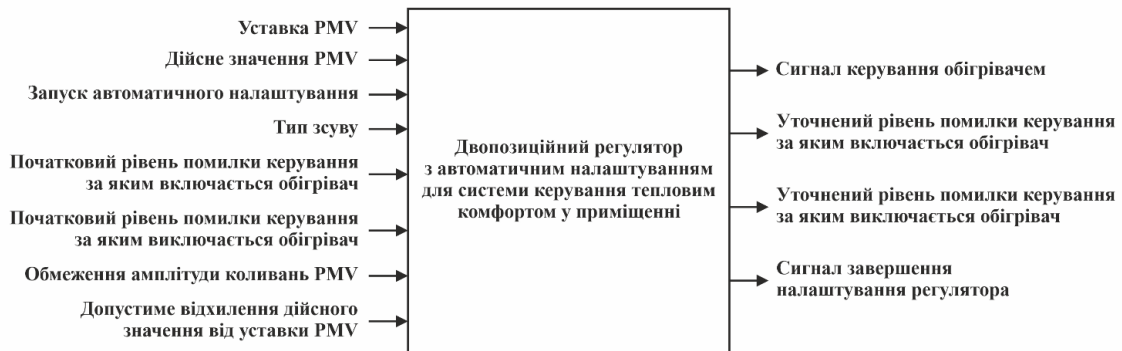


Рисунок 3.20 – Вхідні та вихідні параметри двопозиційного регулятора з автоматичним налаштуванням для системи керування тепловим комфортом у приміщенні

### 3.5 Дослідження системи керування тепловим комфортом з автоматичним налаштуванням

На основі розробленого двопозиційного регулятора, відповідно до запропонованої методики та алгоритму уточнення параметрів, у графічному середовищі імітаційного моделювання Simulink математичного пакету MATLAB створено модель системи керування тепловим комфортом.

Модель дозволяє: досліджувати динаміку процесу керування у реальному масштабі часу, варіювати вхідні параметри (уставку PMV, тип зсуву, пороги включення/виключення, допустиме відхилення тощо), оцінювати ефективність регулятора за різних умов експлуатації, аналізувати відповідність дійсного значення PMV заданим критеріям комфорту, контролювати енерговитрати системи опалення.

Структурна схема моделі, що ілюструє взаємодію між блоками регулятора, середовищем приміщення та джерелом теплового впливу, наведена на рисунку 3.21. Вона відображає логіку роботи системи в замкнутому контурі з використанням прогнозованої оцінки PMV як зворотного зв'язку.



Результати моделювання для кожного типу зсуву наведені у таблиці 3.10, яка містить: уточнені значення  $\Delta PMV'_{\text{ВКЛОБ}}$  та  $\Delta PMV'_{\text{ВИКЛОБ}}$ , амплітуду коливань  $PMV$ , відповідність до уставки, енерговитрати системи, статус досягнення усталеного режиму

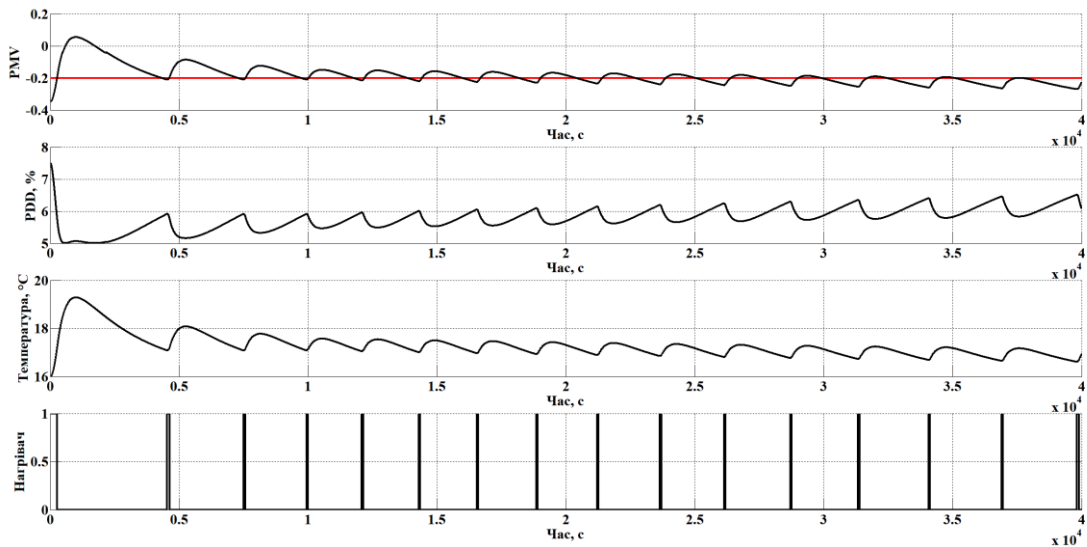


Рисунок 3.22 – Результат моделювання автоматичного налаштування двопозиційного регулятора зі зсувом нижче уставки

Аналіз отриманих результатів моделювання підтвердив, що запропонована методика налаштування параметрів двопозиційного регулятора забезпечує автоматичну адаптацію системи керування тепловим комфортом до заданих умов експлуатації. Зокрема: для усіх розглянутих типів зсуву дійсного значення прогнозованої середньої оцінки  $PMV$  (нижче уставки, на рівні уставки, вище уставки) система демонструє стабільне функціонування, уточнені параметри регулятора дозволяють досягати заданої уставки  $PMV$  з урахуванням допустимого відхилення та обмеження амплітуди коливань, відбувається автоматичне коригування порогів включення та виключення обігрівача, що забезпечує ефективне керування без перевитрат енергії, система переходить до нормального режиму роботи після завершення процесу уточнення, з використанням оптимізованих параметрів.

Таким чином, методика є універсальною та придатною для реалізації в системах керування мікрокліматом, що базуються на оцінці теплового комфорту за показником  $PMV$ .

Таблиця 3.10 – Результати моделювання за автоматично отриманими налаштуваннями двопозиційного регулятора

Тип зсуву	Нижче уставки	На рівні уставки	Вище уставки
$\Delta PMV_{\text{ВКЛ\_ОБ}}$	0,070	0,030	-0,005
$\Delta PMV_{\text{ВИКЛ\_ОБ}}$	0,060	0,020	-0,010
Середня PMV	-0,22	-0,17	-0,14
PMV <sub>мін.</sub>	-0,27	-0,23	-0,20
PMV <sub>макс.</sub>	-0,19	-0,12	-0,11
Діапазон PMV	0,08	0,11	0,09
Відхилення PMV	0,07	0,08	0,11
Середній PDD, %	6,04	5,61	5,41
T <sub>мін.</sub> , °C	17,30	17,64	17,93
T <sub>макс.</sub> , °C	18,00	18,32	18,40
Середня T, °C	17,71	18,04	18,21
$\Delta E$ , кВт·год.	0,43	0,50	0,55

Аналіз результатів моделювання та уточнення параметрів двопозиційного регулятора показав, що помилка керування, пов'язана зі зсувом дійсного значення прогнозованої середньої оцінки PMV відносно уставки, може бути суттєво зменшена шляхом удосконалення принципу розрахунку відповідного кроку регулювання:

– нижче уставки та на рівні уставки:

$$\Delta PMV_{\text{КРОК\_ОБ}} = |(PMV_{\text{УСТ}} - PMV_{\text{УР\_МАКС}}) / PMV_{\text{УСТ}}| \cdot K, \quad (17)$$

де  $K$  – коефіцієнт кроку який розраховується по досягненню усталеного режиму як:

$$K = \Delta PMV_{\text{КРОК\_ОБ}} / |(PMV_{\text{УСТ}} - PMV_{\text{УР\_МАКС}}) / PMV_{\text{УСТ}}|. \quad (18)$$

– вище уставки:

$$\Delta PMV_{\text{КРОК\_ОБ}} = |(PMV_{\text{УСТ}} - PMV_{\text{УР\_МІН}}) / PMV_{\text{УСТ}}| \cdot K, \quad (19)$$

де  $K$  – коефіцієнт кроку який розраховується по досягненню усталеного режиму як:

$$K = \Delta PMV_{\text{КРОК\_ОБ}} / |(PMV_{\text{УСТ}} - PMV_{\text{УР\_МІН}}) / PMV_{\text{УСТ}}|. \quad (20)$$

Аналіз алгоритму уточнення параметрів двопозиційного регулятора показав, що використання формул (17–20) для розрахунку кроку зміни рівня помилки керування у загальному випадку призводить до збільшення кількості ітерацій пошуку оптимальних налаштувань. Це пов'язано з тим, що фіксований крок не

завжди забезпечує достатню точність регулювання в умовах змінних параметрів середовища.

Водночас, комбінація запропонованої методики налаштування з удосконаленим принципом адаптивного розрахунку кроку дозволяє реалізувати інтелектуальну систему керування тепловим комфортом, яка автоматично адаптується до поточних умов.

Етапи функціонування системи: перший запуск: система працює в режимі початкового налаштування, де крок зміни рівня помилки керування визначається за формулою (5), тобто як половина діапазону нечутливості регулятора. Після завершення процесу уточнення параметрів: система переходить до адаптивного режиму, в якому крок регулювання розраховується динамічно відповідно до формул (17–20), з урахуванням поточної амплітуди коливань PMV, швидкості наближення до уставки та стабільності перехідного процесу.

Результати моделювання адаптивної системи керування тепловим комфортом, що демонструють її здатність до самоналаштування та ефективного регулювання, наведені на рисунку 3.23.

Запропонований підхід дозволяє: зменшити кількість ітерацій у процесі налаштування, забезпечити точне досягнення уставки PMV, реалізувати адаптивну систему керування, здатну автоматично коригувати свої параметри відповідно до змін середовища, підвищити енергоефективність та стабільність роботи системи в реальних умовах.

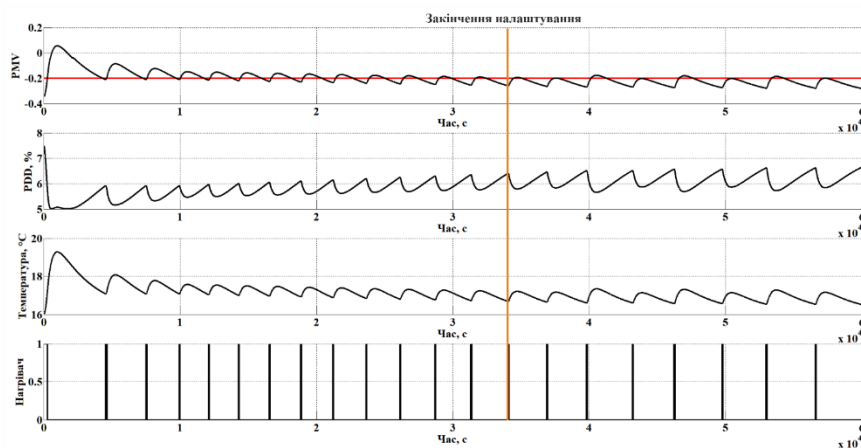


Рисунок 3.23 – Результат моделювання системи керування тепловим комфортом у приміщенні на базі адаптивного двопозиційного регулятора

Результати проведених досліджень підтверджують, що розроблена адаптивна система керування тепловим комфортом у приміщенні, реалізована на базі двопозиційного регулятора, забезпечує високу енергоефективність відповідно до вимог.

Основні переваги системи:

- Автоматичне визначення параметрів регулятора дозволяє усунути головний недолік традиційного двопозиційного керування – обмежену зручність використання у побутових умовах, що зазвичай потребує ручного налаштування.
- Функціонування в адаптивному режимі забезпечує динамічне підлаштування до змін параметрів приміщення, таких як температура, вологість, теплове випромінювання, фізіологічні характеристики користувача тощо.
- Система демонструє стабільну роботу в умовах змінних навантажень, зберігаючи тепловий комфорт при раціональному використанні енергоресурсів.

Таким чином, запропоноване рішення є технічно реалізованим, економічно доцільним та функціонально гнучким, що відкриває перспективи його впровадження у побутові та комерційні системи керування мікрокліматом.

### **3.6 Висновки**

1. Досліджено потенціал зниження енерговитрат шляхом адаптивного керування системою опалення на основі параметрів теплового комфорту. Орієнтація не лише на фіксовані температурні значення, а на комплексні показники комфорту дозволяє: зменшити надлишкове споживання енергії без втрати якості мікроклімату, підвищити ефективність роботи нагрівального обладнання, покращити загальний комфорт перебування людей у приміщенні та дозволяють сформулювати рекомендації щодо впровадження інтелектуальних регуляторів теплового комфорту у реальні об'єкти, з урахуванням технічних обмежень та нормативних вимог.

2. Проведено дослідження ефективності традиційного підходу до керування системою опалення, заснованого на підтримці постійної температури повітря до адаптивного керування за показниками теплового комфорту.

Встановлено, що традиційний підхід забезпечує стабільність температурного режиму та енергоспоживання, проте не гарантує досягнення індивідуального теплового комфорту. Ігнорування фізіологічних особливостей користувача, динамічних змін мікроклімату та параметрів, що впливають на теплове сприйняття, призводить до відхилення показників PMV і PPD від нормативних значень. Це свідчить про необхідність переходу до адаптивного керування опаленням, орієнтованого на комплексну оцінку теплового комфорту, що дозволить підвищити якість мікроклімату та знизити енерговитрати.

3. У дисертаційній роботі сформульовано перше наукове положення: керування на підставі комплексного параметру теплового комфорту, забезпечує зниження витрат енергії на опалення порівняно з традиційними системами керування.

4. Розроблено систему керування тепловим комфортом, яка враховує не лише температуру повітря, а й комплекс мікрокліматичних параметрів, система базується на використанні індексів PMV та PPD як критеріїв оцінки комфорту, що дозволяє: забезпечити адаптивне керування опаленням відповідно до реального теплового сприйняття, підвищити точність регулювання мікроклімату, знизити енерговитрати за рахунок уникнення надмірного нагріву, покращити загальне самопочуття та продуктивність користувачів.

5. Розроблено систему керування тепловим комфортом з автоматичним налаштуванням на базі двопозиційного регулятора. Запропонований підхід забезпечує простоту реалізації, надійність роботи та здатність адаптуватися до змін мікрокліматичних умов. Проведене моделювання підтвердило, що така система: забезпечує підтримку теплового комфорту в межах допустимих значень, дозволяє знизити енерговитрати порівняно з традиційним регулюванням за температурою, демонструє стабільну роботу в умовах змін зовнішніх збурень, є придатною для використання в побутових і комерційних приміщеннях. Двопозиційний регулятор із автоматичним налаштуванням на основі індексів комфорту є ефективним рішенням для реалізації енергоощадного керування мікрокліматом.

6. У дисертаційній роботі сформульовано друге наукове положення: добуток коефіцієнта кроку та модуля відношення між різницею уставки комплексного параметра теплового комфорту і його максимальним значенням, визначає параметри налаштування регулятора, що забезпечує стабільність та ефективність функціонування системи керування в умовах зміни мікроклімату приміщення

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ КОМФОРТОМ

У сучасних умовах підвищених вимог до енергоефективності та комфорту в житлових і комерційних приміщеннях особливої актуальності набувають інтелектуальні системи керування мікрокліматом. Одним із ключових показників, що визначає суб'єктивне теплове самопочуття людини, є прогнозована середня оцінка PMV, яка враховує комплекс фізіологічних та мікрокліматичних параметрів. У цьому розділі представлено технічну реалізацію системи керування тепловим комфортом на базі двопозиційного регулятора, що поєднує простоту апаратної реалізації з алгоритмічною гнучкістю. Розроблена система здатна автоматично адаптуватися до змін умов середовища, забезпечуючи підтримку заданого рівня комфорту при мінімальних енерговитратах.

#### **4.1 Структура системи керування тепловим комфортом**

На основі проведених досліджень розроблено узагальнену структуру системи керування тепловим комфортом, що наведена на рисунку 4.1. Структура орієнтована на забезпечення адаптивного регулювання параметрів мікроклімату приміщення відповідно до індексів PMV та PPD, які є міжнародно визнаними критеріями оцінки теплового самопочуття згідно з ISO 7730.

Автоматизоване робоче місце оператора (АРМ) АРМ може бути реалізоване у вигляді: персонального комп'ютера з інтегрованою SCADA-системою; веб-інтерфейсу через браузер; мобільного додатку.

Через АРМ здійснюється: введення уставки теплового комфорту (цільове значення PMV); синхронізація часу; доступ до прогнозу погоди через Інтернет; вибір типу діяльності користувача; вибір типу одягу, що впливає на розрахунок PMV.

Пристрій керування На основі введених параметрів та поточних значень PMV/PPD пристрій виконує: розрахунок керуючого сигналу; передавання сигналу на виконавчий пристрій.

Виконавчий пристрій Здійснює регулювання температури та вологості у приміщенні шляхом: зміни потужності обігрівача; активації зволожувача або вентиляції.

Датчик теплового комфорту Виконує вимірювання поточних параметрів мікроклімату та розрахунок: прогнозованої середньої оцінки PMV; прогнозованого проценту незадоволених PPD.

Отримана структура є універсальною та може бути використана: при проектуванні нових систем керування мікрокліматом; для модернізації існуючих систем опалення та охолодження.

Зважаючи на те, що в більшості будівель вже встановлені традиційні системи ОВК (опалення, вентиляція, кондиціювання), перспективним напрямом є розробка автономного пристрою, який: інтегрується з наявним обладнанням; виконує локальне керування тепловим комфортом; забезпечує енергоефективність без потреби повної реконструкції системи.

Такий пристрій може включати: модуль збору даних (температура, вологість, швидкість повітря); обчислювальний блок для розрахунку PMV/PPD; інтерфейс для взаємодії з користувачем; модуль керування виконавчими елементами.

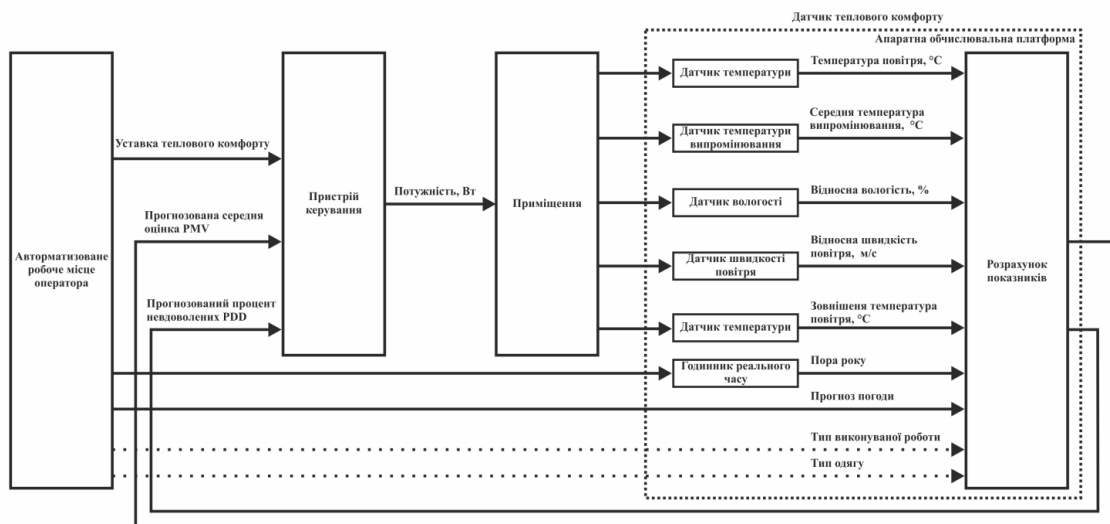


Рисунок 4.1 – Загальна структура системи керування тепловим комфортом

На сучасному етапі розвитку систем автоматичного керування мікрокліматом найбільш поширеним засобом підтримки температури у приміщеннях є терморегулятори, які встановлюються безпосередньо у зоні комфорту або поблизу

неї. Такі пристрої обладнані датчиками температури та комутаційними контактами, що дозволяють керувати опалювальними або охолоджувальними приладами.

Більшість газових котлів, систем припливної вентиляції, а також електричних обігрівачів мають можливість інтеграції з терморегуляторами або вже експлуатуються у складі таких систем. Проте, з огляду на тенденції енергоефективного будівництва та рішення, прийняті в Європейському Союзі щодо декарбонізації та цифровізації систем ОВК, перспективним є створення нового типу регулятора, який забезпечує керування тепловим комфортом, а не лише температурою.

На основі проведених досліджень розроблено структуру регулятора теплового комфорту, що наведена на рисунку 4.2. Вона включає такі функціональні компоненти:

Пульти керування забезпечує введення параметрів: уставки теплового комфорту (цільове значення PMV), часу реального годинника, типу виконуваної роботи (метаболічна активність), типу одягу (термічний опір).

Регулятор має можливість підключення до мережі для: отримання прогнозу погоди; синхронізації часу; оновлення параметрів керування.

Передбачено дистанційний доступ до регулятора через мобільний інтерфейс, що дозволяє: змінювати налаштування; переглядати поточні параметри комфорту; отримувати повідомлення про стан системи.

Зважаючи на різноманітність опалювального та охолоджувального обладнання, регулятор повинен підтримувати кілька режимів керування.

Таблиця 4.1 – Режими керування

Тип керування	Опис
Комутація сигнальних ліній	Передача логічного сигналу на зовнішній контролер або реле
Комутація однофазного навантаження	Керування навантаженням до 16 А або 25 А через силові реле
Комутація трьохфазного навантаження	Керування промисловими приладами через контактори або SSR
Безперервне керування	Регулювання потужності через ШІМ, аналоговий сигнал або Modbus

У випадках, коли регулятор безпосередньо керує електричним навантаженням, доцільним є вимірювання споживаної потужності, що дозволяє: оцінити енергоефективність; реалізувати функції моніторингу та захисту; адаптувати керування відповідно до фактичного теплового впливу.

Запропонована структура регулятора теплового комфорту дозволяє: інтегруватися з існуючими системами опалення та вентиляції; забезпечити інтелектуальне керування мікрокліматом на основі індексів PMV/PPD; реалізувати гнучке керування навантаженням з урахуванням типу обладнання; підвищити енергоефективність та якість теплового середовища у приміщенні.

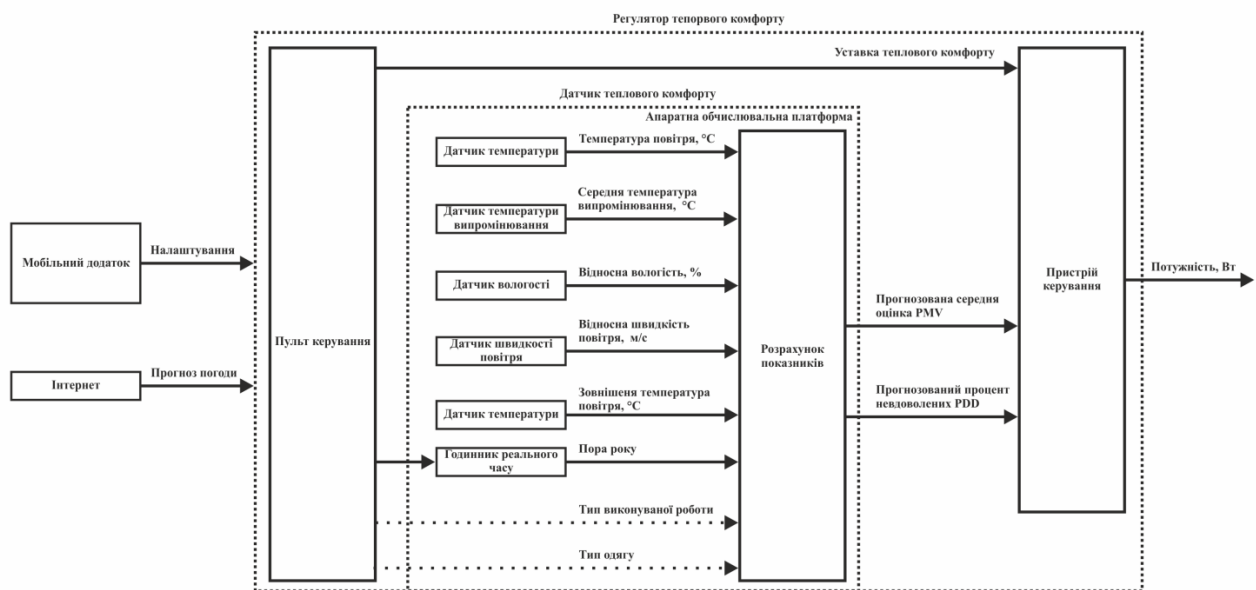


Рисунок 4.2 – Загальна структура регулятора теплового комфорту

Запропонована структура регулятора теплового комфорту дозволяє реалізувати універсальні пристрої, які можуть бути інтегровані як у системи опалення, так і у системи охолодження повітря, а також у комбіновані системи ОВК. Такий підхід забезпечує гнучкість та масштабованість при впровадженні технологій керування мікрокліматом у житлових, офісних та промислових приміщеннях.

Універсальність регулятора досягається завдяки: підтримці різних типів виконавчих пристроїв (електричних, газових, вентиляційних); можливості комутації навантажень різної потужності (однофазних, трьохфазних, безперервних); адаптації до змінних умов експлуатації (сезонність, тип діяльності, одяг користувача).

## 4.2 Комплекс технічних засобів системи керування тепловим комфортом

Для забезпечення цілодобового контролю параметрів мікроклімату та безпечного використання електричного обладнання в процесі дослідження керування тепловим комфортом розроблено інтелектуальний пристрій керування, який реалізує повний цикл збору, обробки, реєстрації та передачі даних.

Основні функції пристрою: контроль температури та вологості у декількох точках приміщення, вимірювання атмосферного тиску, струму, напруги та споживаної потужності, реєстрація результатів вимірювання з часовими мітками, візуалізація та передача даних до автоматизованих робочих місць.

Аналіз пристроїв керування навантаженням потужністю до 2 кВт, зокрема SONOFF POWR3, показав: обмеженість функціональних можливостей щодо розширення, ненадійність виконавчих пристроїв, які не гарантують повне відключення навантаження, відсутність гнучкої інтеграції з системами дослідження [60].

У відповідь на виявлені недоліки, на кафедрі кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ “Дніпровська політехніка” розроблено пристрій керування системи дослідження (рис. 4.3), побудований на базі контролера WEMOS D1 R32 (A2) [61].

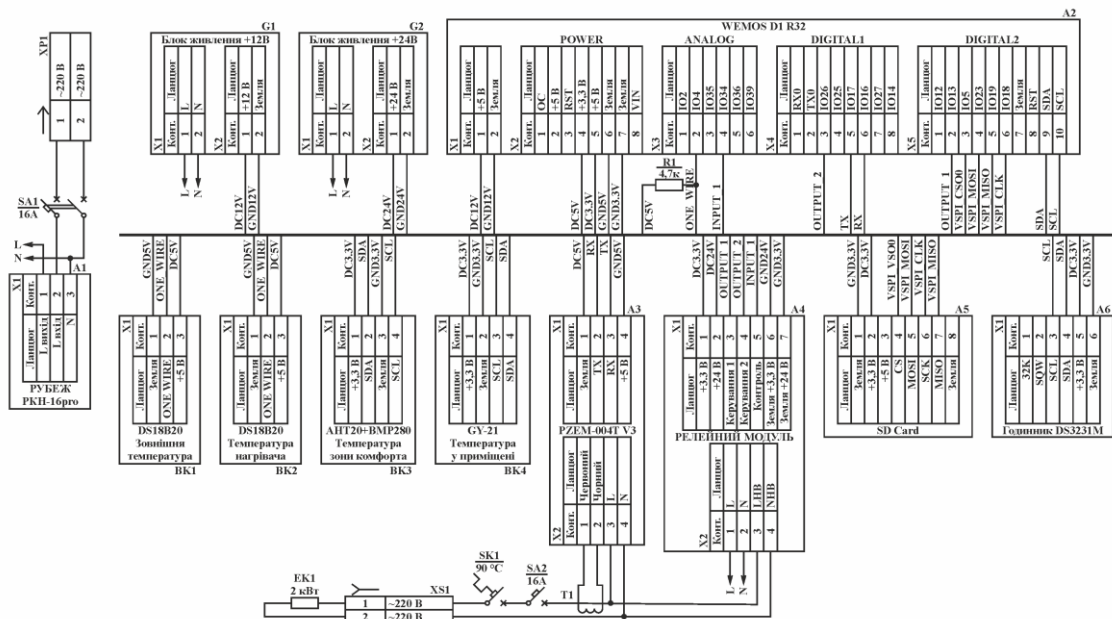


Рисунок 4.3 – Схема електрична принципова пристрою керування системи дослідження

Комунікаційні можливості: робота у режимі точки доступу Wi-Fi або підключення до існуючої мережі, обмін даними з ПК – протокол Modbus TCP, обмін з мобільними пристроями – протокол MQTT.

Реєстрація даних: формат CSV на Micro SD карту (A5), часові мітки – годинник реального часу DS3231M (A6).

Інтерфейси: SPI – для Micro SD, I<sup>2</sup>C – для годинника та внутрішніх датчиків, 1-Wire – для DS18B20, UART – для модуля PZEM-004T.

Таблиця 4.2 – Вимірювальні модулі

Параметр	Датчик / Модуль	Діапазон / Особливості
Зовнішня температура	DS18B20 (BK1)	-55...+125 °C, сталевий корпус
Температура, вологість, тиск (зона комфорту)	АНТ20 + BMP280 (BK3)	-40...+85 °C, 0-100 %, 300-1100 гПа
Температура, вологість (загальна зона)	GY-21 (BK4)	-40...+85 °C, 0-100 %
Струм, напруга, потужність	PZEM-004T V3 (A3)	до 100 А, UART

Контроль температури нагрівача за допомогою DS18B20 (BK2) та термостата SK1, який розриває ланцюг при 90 °C. Захист живлення: від перевантаження та короткого замикання – автоматичний вимикач SA2, від недопустимих параметрів мережі – реле контролю напруги РУБЕЖ РКН-16pro (A1).

Для керування навантаженням розроблено релейний модуль (A4) з двома послідовно з'єднаними реле, що забезпечує: резервне вимкнення у разі зварювання контактів другого реле.

З огляду на виявлені недоліки, було обґрунтовано необхідність розробки спеціалізованого релейного модуля (рис. 4.3), який: забезпечує підвищену надійність комутації електричного обігрівача, дозволяє контролювати наявність напруги на навантаженні, підтримує інтеграцію з системою керування тепловим комфортом, відповідає вимогам довготривалої експлуатації в умовах змінного навантаження.

Такий модуль є ключовим елементом апаратної реалізації системи дослідження процесу керування тепловим комфортом, що забезпечує технічну надійність, безпеку та функціональну гнучкість.[63]

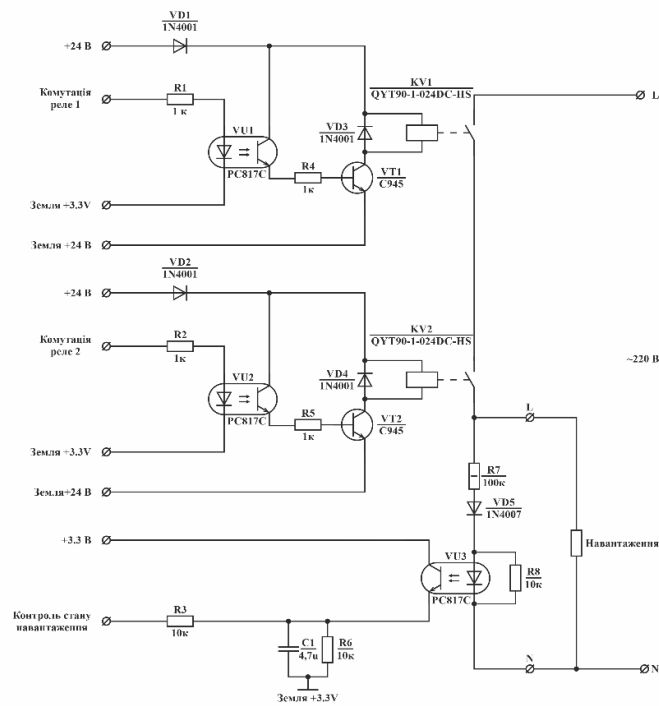


Рисунок 4.3 – Схема електрична принципова релейного модуля системи дослідження керування тепловим комфортом

У складі модуля передбачено два реле:

- Реле вільної комутації фази – забезпечує базове перемикання фазного провідника;
- Реле комутації фази на навантаження – виконує безпосереднє керування живленням обігрівача.

Обидва реле оснащені котушками на 24 В, що відповідає промисловим вимогам до надійності та термостійкості. Керування здійснюється низьковольтним пристроєм на 3,3 В, який гальванічно розв'язаний від силової частини, що забезпечує електричну ізоляцію та захист керуючого мікроконтролера.

Особливістю конструкції є реалізація гальванічно розв'язаного контролю наявності напруги на навантаженні, що дозволяє: виявляти зварювання контактів реле, підтверджувати факт комутації, підвищити надійність роботи системи в аварійних режимах.

З метою забезпечення електробезпеки при використанні електричного обігрівача в складі системи керування, рекомендовано: підключати живлення релейного модуля через автоматичний вимикач, що забезпечує захист від короткого

замикання та перевантаження, підключати обігрівач через термовимикач з ручним відновленням роботи, що виконує функцію теплового захисту у разі перегріву.

Така схема підключення дозволяє запобігти пошкодженню обладнання, знизити ризики пожежонебезпечних ситуацій та забезпечити відповідність вимогам електробезпеки.

Розроблена система дослідження процесу керування тепловим комфортом забезпечує надійне та багатофункціональне керування електронагрівачем, а також комплексний моніторинг параметрів мікроклімату у багатокімнатному приміщенні. До складу системи входять засоби вимірювання:

- температури повітря: зовнішньої, у загальній зоні приміщення, у зоні теплового комфорту;
- відносної вологості повітря: у зоні комфорту, поза її межами;
- атмосферного тиску;
- температури нагрівача.

Система реалізує реєстрацію отриманих даних на носій інформації (Micro SD) з прив'язкою до часових міток, а також відображення параметрів у реальному часі на автоматизованих робочих місцях операторів, що забезпечує: оперативний контроль стану системи, аналіз динаміки процесу керування, виявлення відхилень та аварійних ситуацій.

Така архітектура дозволяє інтегрувати систему у складніші комплекси автоматизації, забезпечити цілодобову роботу, високу надійність та гнучкість налаштування відповідно до умов експлуатації.

### **4.3 Розробка програмного забезпечення системи керування тепловим комфортом**

Для забезпечення надійного функціонування релейного модуля в складі системи керування тепловим комфортом розроблено алгоритм роботи у вигляді графу станів, що наведений на рисунку 4.4. Такий підхід дозволяє формалізувати логіку комутації електричного навантаження та забезпечити гнучкість програмної реалізації.

Граф станів описує послідовність переходів між основними режимами роботи. Алгоритм є універсальним і може бути реалізований у вигляді програмного забезпечення для будь-якого програмного пристрою керування, включаючи мікроконтролери, вбудовані системи або промислові ПЛК.

Розроблений алгоритм роботи релейного модуля є технічно обґрунтованим та функціонально завершеним рішенням, що дозволяє реалізувати інтелектуальне керування електричним обігрівачем у складі системи теплового комфорту.

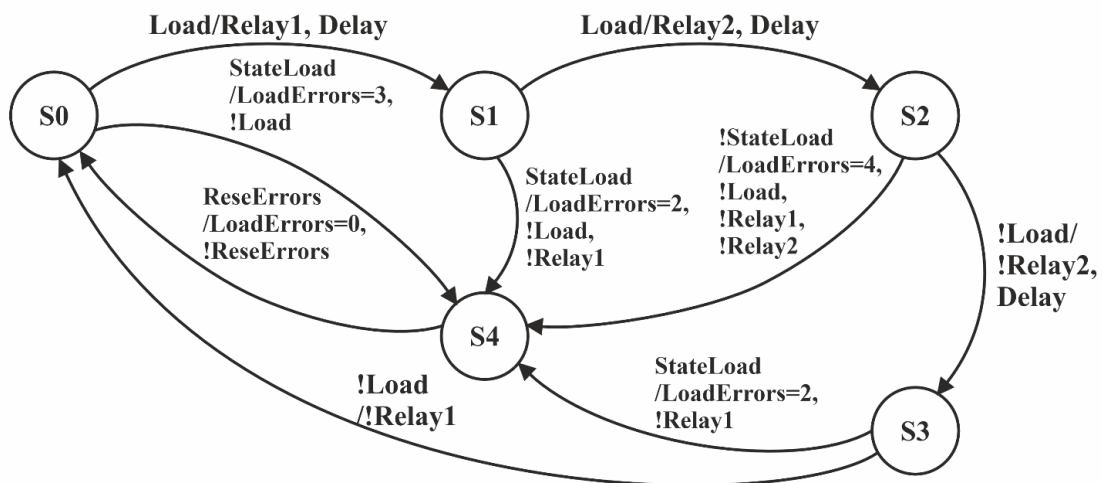


Рисунок 4.4 – Граф роботи програмного забезпечення релейного модуля системи дослідження керування тепловим комфортом

Спочатку модуль знаходиться у стані стоп S0. Після подачі запиту на включення навантаження Load, вмикається реле вільної комутації фази Relay1, виконується витримка на спрацювання реле Delay та перехід до стану включення навантаження S1. Вмикається реле комутації фази на навантаження Relay2, виконується витримка Delay та перехід до стану роботи навантаження S2. Після зняття запиту на включення навантаження !Load, вимикається реле комутації фази на навантаження Relay2, виконується витримка Delay та перехід до стану виключення навантаження S3. Вимикається реле вільної комутації фази !Relay1 та виконується перехід до стану стоп S0.

У стані стоп S0 за наявності сигналу контролю стану навантаження StateLoad встановлюється помилка зварювання силових контактів обох реле LoadErrors=3,

скидається запит на включення !Load та виконується перехід до стану помилки S4. У стані включення навантаження S1 за наявності сигналу контролю стану навантаження StateLoad встановлюється помилка зварювання силових контактів реле комутації фази на навантаження LoadErrors=2, скидається запит на включення !Load, вимикається реле вільної комутації фази !Relay1 та виконується перехід до стану помилки S4. У стані роботи навантаження S2 за відсутності сигналу контролю стану навантаження !StateLoad встановлюється помилка відсутності електричної мережі LoadErrors=4, скидається запит на включення !Load, вимикаються обидва реле та виконується перехід до стану помилки S4. У стані виключення навантаження S2 за наявності сигналу контролю стану навантаження StateLoad встановлюється помилка зварювання силових контактів реле комутації фази на навантаження LoadErrors=2, скидається запит на включення !Load, вимикається реле вільної комутації фази !Relay1 та виконується перехід до стану помилки S4.

У стані помилки S4 за наявності сигналу ResetErrors, скидається помилка LoadErrors=0, !ResetErrors та виконується перехід до стану стоп S0.

Проведені випробування релейного модуля, інтегрованого до складу дослідницької системи керування тепловим комфортом, реалізованим відповідно до розробленого алгоритму, підтвердили його функціональну відповідність технічним вимогам.

Двоетапне включення та виключення навантаження (через реле вільної комутації фази та реле комутації фази на навантаження) дозволяє підвищити надійність комутації електричного обігрівача, зменшуючи ризик зварювання контактів.

Використання термовимикача з ручним відновленням забезпечує аварійне вимкнення обігрівача у випадку зварювання силових контактів обох реле.

Автоматичний вимикач виконує функцію захисту від перевантаження, що відповідає вимогам електробезпеки.

Крім того, враховано особливості сучасних електричних обігрівачів, які, як правило, оснащені вбудованими електромеханічними або мікропроцесорними пристроями обмеження температури, що забезпечують додатковий рівень захисту.

До складу дослідницької системи також інтегровано датчик температури обігрівача, за показниками якого реалізовано логіку вимкнення пристрою при досягненні температури, нижчої за поріг перегріву, що дозволяє запобігти аварійним режимам.

#### **4.3.1 Розробка програмного забезпечення системи керування тепловим комфортом на базі двопозиційного регулятора**

Сучасні автоматизовані системи керування технологічними процесами мають ієрархічну структуру, що включає три основні рівні: польовий, автоматичного керування та операторський. Кожен із них виконує специфічні функції, забезпечуючи цілісність, надійність і гнучкість керування.

Польовий рівень охоплює безпосередню взаємодію з технологічним процесом і включає: датчики фізичних параметрів (температура, тиск, витрата тощо), виконавчі пристрої (електромагнітні клапани, реле, приводи), системи віддаленого вводу-виводу, спеціалізовані контролери, частотні перетворювачі та сервоприводи.

Рівень автоматичного керування забезпечує логіку функціонування системи та включає: промислові програмовані логічні контролери (ПЛК), пульти локального керування, модулі вводу-виводу, комунікаційні інтерфейси для обміну даними між рівнями.

Операторський рівень відповідає за моніторинг, аналіз та втручання у процес керування: сервери SCADA-систем та баз даних, автоматизовані робочі місця операторів, засоби візуалізації, архівування та звітності.

Таким чином, програмне забезпечення системи керування у загальному випадку складається з: логіки керування, реалізованої на рівні контролера, інтерфейсного та аналітичного середовища, реалізованого у складі SCADA-системи.

Ця структура дозволяє забезпечити масштабованість, модульність та високу надійність автоматизованих систем, що є критично важливим для керування складними технологічними процесами, зокрема – у сфері енергозбереження та мікроклімату приміщень.

У рамках дослідження процесу керування тепловим комфортом створено функціональний пристрій керування, реалізований на базі контролера WEMOS D1 R32, який поєднує доступність апаратної платформи з широкими можливостями інтеграції у бездротові мережі.

Пристрій забезпечує вимірювання таких параметрів: зовнішньої температури, температури нагрівача, температури та вологості у зоні комфорту та загальній зоні, споживаної потужності, атмосферного тиску на рівні приміщення.

Окрім функцій моніторингу, пристрій виконує включення/виключення електричного нагрівача та реєстрацію процесу керування на носій інформації з прив'язкою до поточного часу, що дозволяє здійснювати ретроспективний аналіз роботи системи.

Для забезпечення повноцінного функціонування пристрою розроблено програмне забезпечення, яке реалізує: логіку керування нагрівачем відповідно до алгоритму регулятора, реєстрацію даних у локальну пам'ять, роботу у режимі точки доступу Wi-Fi або елемента бездротової мережі, доступ до актуальних даних за допомогою протоколу Modbus TCP, що забезпечує сумісність з промисловими системами автоматизації [61].

З метою забезпечення оперативного доступу до параметрів процесу керування, розроблено програмне забезпечення рівня автоматизованого керування, яке реалізує людино-машинний інтерфейс (HMI) на базі SCADA-системи zenon Supervisor 7.10.

Інтерфейс дозволяє: візуалізувати поточні значення параметрів мікроклімату, контролювати стан нагрівача та релейного модуля, переглядати історію керування, здійснювати ручне втручання у процес при необхідності.

Графічна реалізація інтерфейсу наведена на рисунку 4.5, що демонструє інтеграцію польового рівня з операторським середовищем.

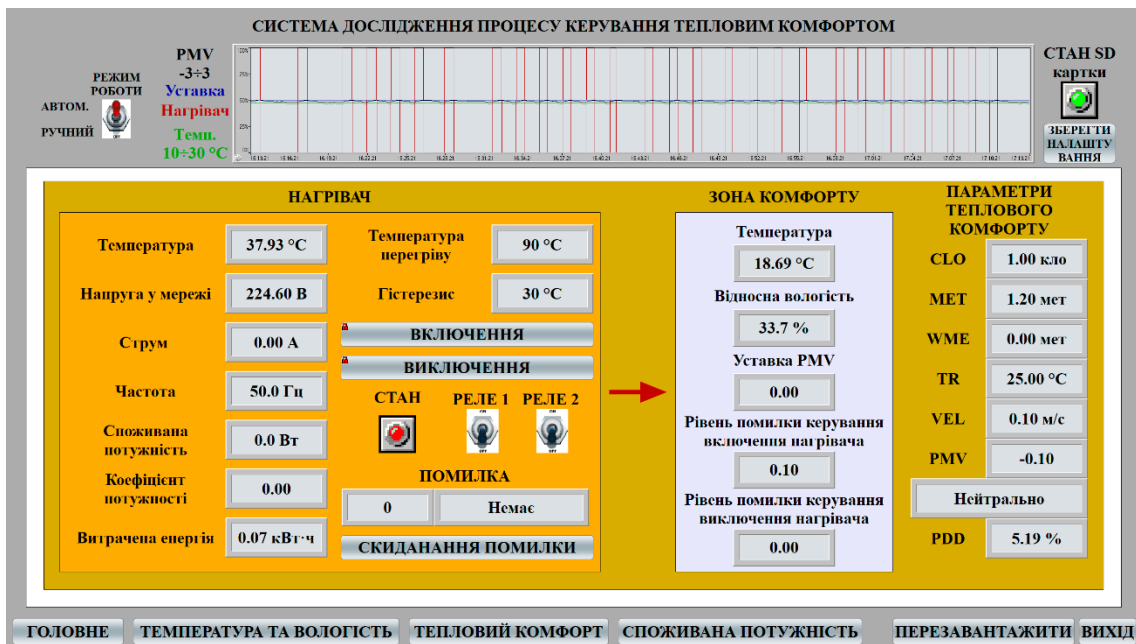


Рисунок 4.5 – Людино-машинний інтерфейс системи дослідження керування тепловим комфортом

У межах реалізації автоматизованої системи керування тепловим комфортом розроблено програмне забезпечення людино-машинного інтерфейсу (НМІ), що функціонує у середовищі SCADA-системи zenon Supervisor 7.10. Інтерфейс забезпечує візуалізацію, контроль та реєстрацію параметрів мікроклімату, а також керування виконавчими пристроями у реальному часі.

Програмне забезпечення складається з п'яти функціональних зображень: Головне зображення – містить інформацію про: температуру та вологість у зоні комфорту та загальній зоні, зовнішню температуру та температуру нагрівача, напругу та частоту електричної мережі, струм, споживану потужність нагрівача та загальну витрачену енергію, стан виконавчих пристроїв з можливістю ручного керування.

Температура – деталізує температурні параметри в усіх зонах.

Вологість та тиск – відображає рівень вологості та атмосферного тиску.

Споживана потужність – містить графіки енергоспоживання та динаміку навантаження.

Тепловий комфорт – реалізує розрахунок показників PMV та PPD відповідно до стандарту.

Програмне забезпечення виконує розрахунок у реальному часі: прогнозованої середньої оцінки PMV, прогнозованого процента невдоволених PPD.

У процесі розрахунку враховуються: температура та вологість у зоні комфорту, середній рівень випромінювання (залежить від електрообладнання та температури нагрівача, не повинен перевищувати  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), відносна швидкість повітря (у межах  $0,10\text{--}0,15\text{ м/с}$  для житлових та офісних приміщень), швидкість обміну речовин ( $1,0\text{ met}$  – «сидячі розслаблено»,  $1,2\text{ met}$  – «сидяча робота»), тип одягу (еквівалентне значення –  $1,2\text{ clo}$  для стандартного комплекту).

Результати розрахунку відображаються на тренді головного зображення та деталізуються на окремому зображенні «Тепловий комфорт».

Для реєстрації поточних даних використано модуль Historian, який зберігає значення у форматі CSV (Comma-Separated Values). Це дозволяє: здійснювати архівування параметрів, виконувати подальшу обробку у Microsoft Excel або іншому програмному забезпеченні для роботи з електронними таблицями, формувати аналітичні звіти та графіки.

Безпосереднє дослідження процесу керування тепловим комфортом здійснювалося за допомогою математичного пакету MATLAB, що дозволило верифікувати результати SCADA-системи.

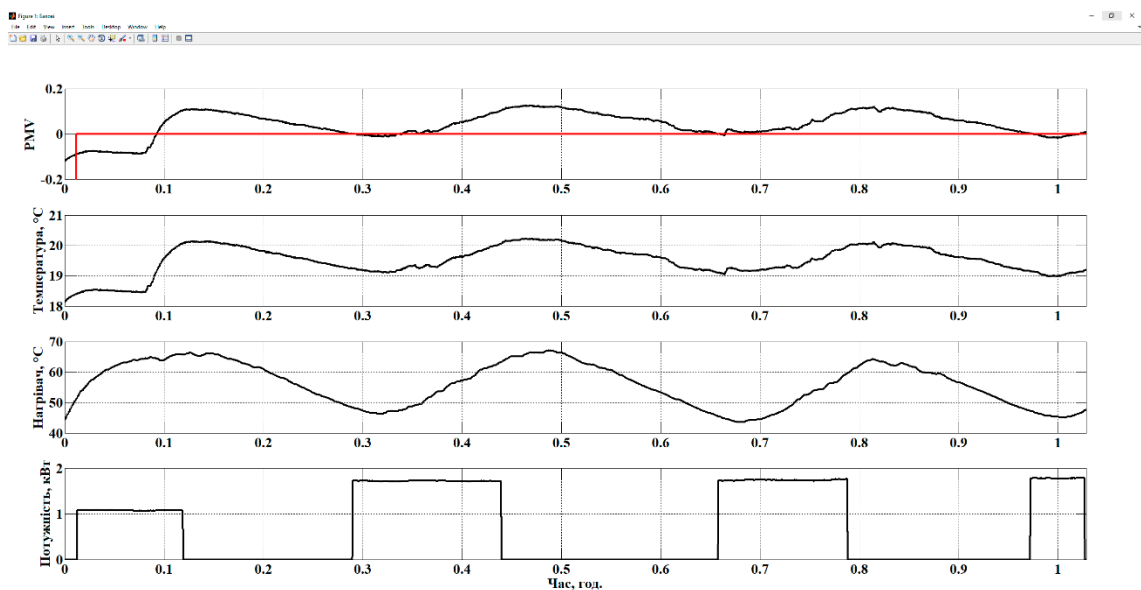


Рисунок 4.6 – Дослідження процесу керування тепловим комфортом здійснювалося з використанням масляного радіатора

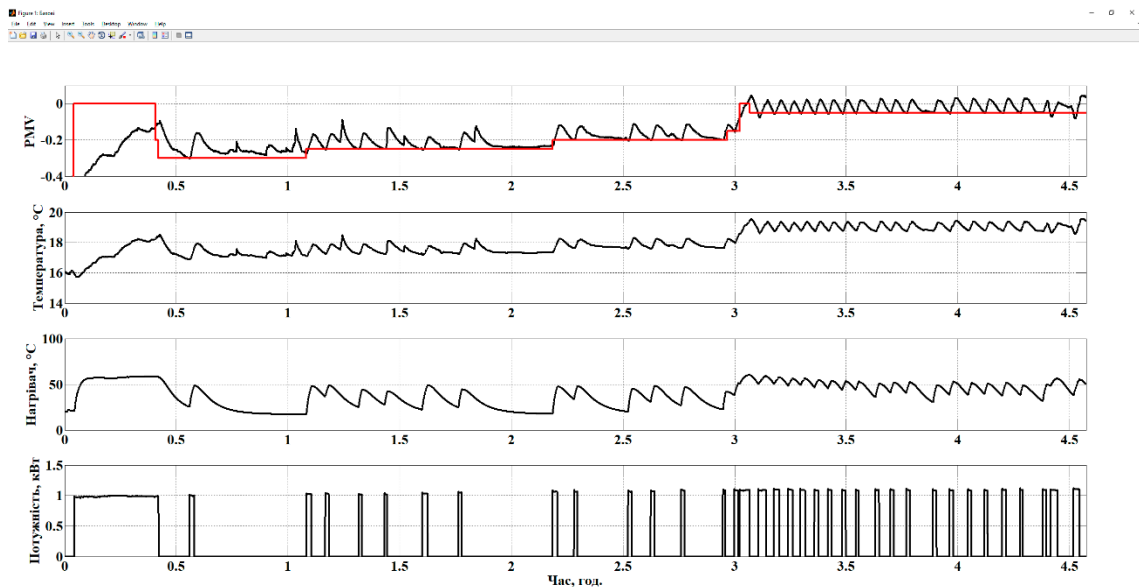


Рисунок 4.7 – Дослідження процесу керування тепловим комфортом здійснювалося з використанням теплового вентилятора

Випробування програмного забезпечення НМІ у складі системи керування з використанням електронагрівача показали: відповідність функціонування технічним вимогам, коректність вимірювання параметрів у заданих діапазонах, можливість поточного нагляду та реєстрації всіх необхідних даних для дослідження процесу керування тепловим комфортом.

#### 4.4 Інтеграція системи керування тепловим комфортом у вже існуючі системи опалення

У сучасних будівлях системи опалення здебільшого функціонують за принципом регулювання температури повітря в приміщенні, що здійснюється за допомогою термостатів або програмованих контролерів. Такий підхід не враховує індивідуальні особливості сприйняття тепла людиною, які залежать від багатьох факторів: типу одягу, рівня фізичної активності, метаболізму, віку, статі тощо. Внаслідок цього виникає дисбаланс між фактичним тепловим станом середовища та суб'єктивним комфортом користувача, що може призводити до зниження продуктивності, самопочуття та нераціонального використання енергоресурсів.

Тепловий комфорт визначається як стан, за якого людина не відчуває ні холоду, ні спеки. Для кількісної оцінки цього стану використовується індекс PMV (Predicted Mean Vote), який враховує шість основних параметрів:

- температура повітря,
- відносна вологість,
- швидкість руху повітря,
- середня температура випромінювання,
- рівень фізичної активності,
- термічний опір одягу.

Інтеграція пристрою керування тепловим комфортом передбачає використання цих параметрів для формування керуючого сигналу, що дозволяє адаптувати роботу системи опалення до індивідуальних потреб користувача.

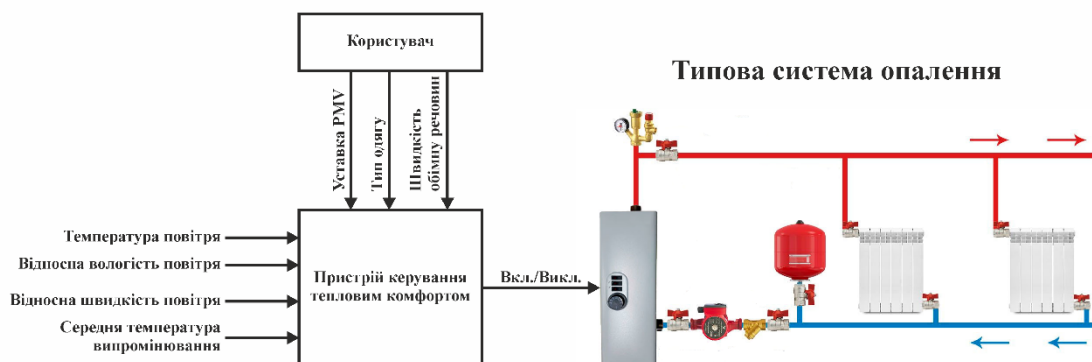


Рисунок 4.8 – Існуюча система керування опаленням з інтеграцією системи керування тепловим комфортом

На рисунку 4.8 представлено схему інтеграції пристрою керування тепловим комфортом у типову систему опалення. Система складається з трьох основних блоків:

1. Користувач. Користувач вводить індивідуальні параметри, які впливають на його сприйняття теплового середовища: установка бажаного рівня PMV, тип одягу (ізоляційні властивості), рівень фізичної активності (метаболічна теплопродукція), обраний рівень комфорту (наприклад, нейтральний, теплий, прохолодний).

2. Пристрій керування тепловим комфортом. Цей блок виконує функцію аналізу та прийняття рішень. Він отримує дані від користувача, а також сенсорну інформацію про поточні мікрокліматичні умови: температура повітря, відносна вологість, швидкість руху повітря, середня температура випромінювання (наприклад, від стін, вікон, меблів).

На основі обробки цих даних пристрій розраховує поточне значення PMV та порівнює його з бажаним. Якщо відхилення перевищує допустимий поріг, формується керуючий сигнал для системи опалення.

3. Типова система опалення. Система включає: джерело тепла (газовий або електричний котел), розширювальний бак, трубопровідну мережу, радіатори, елементи контролю тиску та температури.

Пристрій керування надсилає сигнал "Вкл./Викл." до котла, що дозволяє автоматично регулювати подачу тепла відповідно до потреб користувача.

Інтеграція пристрою керування тепловим комфортом може бути реалізована як модуль розширення до існуючої системи автоматизації будівлі (BMS – Building Management System). Для цього необхідно: встановити сенсори температури, вологості, швидкості повітря та випромінювання, забезпечити інтерфейс введення параметрів користувача (мобільний додаток, сенсорна панель), реалізувати алгоритм розрахунку PMV у мікроконтролері або серверному модулі, інтегрувати керуючий вихід із системою опалення (через реле, цифровий інтерфейс або протокол Modbus).

Інтеграція пристрою керування тепловим комфортом дозволяє досягти наступних результатів: підвищення рівня комфорту за рахунок персоналізованого регулювання теплового середовища, зниження енергоспоживання завдяки точному керуванню режимами роботи системи опалення, гнучкість налаштувань відповідно до змін у поведінці користувача або зовнішніх умов, інтелектуалізація системи з можливістю адаптації та самонавчання.

Запропонована концепція інтеграції пристрою керування тепловим комфортом у типову систему опалення є перспективним напрямом розвитку енергоефективних технологій у будівництві. Вона дозволяє перейти від традиційного регулювання температури до комплексного керування тепловим

комфортом, що враховує як фізичні параметри середовища, так і індивідуальні особливості користувача.

#### **4.5 Висновки**

У межах експериментальних дослідження реалізовано функціональну апаратно-програмну систему керування тепловим комфортом, яка поєднує польовий рівень, автоматичне керування та операторський інтерфейс відповідно до сучасних принципів побудови автоматизованих систем.

Розроблений релейний модуль з двоступеневою комутацією навантаження, гальванічною розв'язкою та контролем наявності напруги на навантаженні забезпечує високу надійність та безпеку керування електронагрівачем.

Реалізований алгоритм роботи релейного модуля у вигляді графу станів дозволяє формалізувати логіку комутації, обробки помилок та переходів між режимами, що забезпечує гнучкість програмної реалізації на будь-якому керуючому пристрої.

Створений пристрій керування на базі контролера WEMOS D1 R32 виконує вимірювання ключових параметрів мікроклімату, керування нагрівачем, реєстрацію даних та передачу інформації через протокол Modbus TCP, що забезпечує інтеграцію з промисловими системами.

Розроблене програмне забезпечення HMI у SCADA-системі zenon Supervisor 7.10 реалізує візуалізацію, контроль та реєстрацію параметрів теплового комфорту, включаючи розрахунок PMV та PPD.

Експериментальні випробування системи та перевірка роботи моделей, алгоритмів і законів керування, підтвердили, що система функціонує відповідно до технічних вимог, забезпечує стабільність роботи, точність вимірювання параметрів та можливість оперативного втручання оператора.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу автоматизації процесу керування опаленням багатокімнатних будівель на основі індексів теплового комфорту PMV та PPD відповідно до вимог стандарту ISO 7730:2005. Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Визначено структуру моделі системи опалення приміщення, яка охоплює основні компоненти та їх взаємозв'язки. Це забезпечує створення гнучкої, масштабованої та енергоефективної системи, здатної підтримувати оптимальні параметри мікроклімату відповідно до вимог теплового комфорту.

2. Розроблено і досліджено математичну модель процесу опалення, що описує теплообмін між джерелом тепла, конструктивними елементами будівлі та внутрішнім середовищем. Модель враховує теплоємність матеріалів, тепловтрати та внутрішні теплові надходження, що створює основу для оптимізації керування опаленням з урахуванням енергоефективності та комфорту.

3. Створено математичні моделі основних компонентів системи – нагрівача, приміщення та датчика температури. Їх інтеграція забезпечує побудову цілісної автоматизованої системи опалення, здатної адаптуватися до змін зовнішніх умов та підтримувати стабільний тепловий комфорт.

4. Розроблено і досліджено моделі збурень, що впливають на тепловий баланс приміщення. Це дозволяє враховувати динамічний характер мікроклімату, прогнозувати вплив зовнішніх факторів та підвищувати точність керування системою.

5. Досліджено потенціал зниження енерговитрат шляхом адаптивного керування системою опалення на основі індексів PMV та PPD. Показано, що такий підхід дозволяє уникати надмірного нагріву, зменшувати споживання енергії та одночасно забезпечувати високий рівень комфорту.

6. Проведено порівняння традиційного та адаптивного підходів до керування опаленням. Встановлено, що підтримка лише температури не гарантує досягнення теплового комфорту, тоді як адаптивне керування за PMV та PPD дозволяє підвищити якість мікроклімату та знизити енерговитрати.

7. Розроблено та досліджено систему керування тепловим комфортом з автоматичним налаштуванням на базі двопозиційного регулятора. Проведене моделювання підтвердило її здатність підтримувати комфорт у межах нормативних значень та знижувати енерговитрати.

8. Реалізовано апаратно-програмну систему керування, що включає: релейний модуль з двоступеневою комутацією навантаження та гальванічною розв'язкою, пристрій керування на базі контролера WEMOS D1 R32 з підтримкою протоколу Modbus TCP, програмне забезпечення HMI у SCADA-системі zenon Supervisor 7.10 для візуалізації, контролю та розрахунку індексів PMV і PPD. Експериментально підтверджено можливості системи функціонувати відповідно до запропонованих алгоритмів та законів керування, система функціонує відповідно до технічних вимог та забезпечує стабільність роботи.

9. Обґрунтовано можливості інтеграції запропонованого підходу у вже існуючі системи опалення багатокімнатних будівель без необхідності повної заміни обладнання, що відкриває перспективи для модернізації житлових та комерційних об'єктів.

Дисертаційна робота доводить, що автоматизація процесу керування опаленням багатокімнатних будівель на основі індексів теплового комфорту PMV та PPD є ефективним інструментом для підвищення якості мікроклімату та зменшення енергетичних витрат. Розроблені моделі, алгоритми та апаратно-програмні засоби забезпечують практичну реалізацію цього підходу та мають значний потенціал для впровадження у сучасні та модернізовані будівлі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ahmad M.W., Mourshed M., Yuce B., Rezgui Y. Computational intelligence techniques for HVAC systems: A review // *Building Simulation: 2016-V. 9.- №4*. P 359-398.
2. Dounis A.I., Caraiscos C. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009. -V. 13-P. 1246–1261.
3. Kramer R., J. van Schijndel, Schellen H. Simplified thermal and hygric building models: A literature review // *Frontiers of Architectural Research- 2012- V. 1. №4.- P. 318-325*.
4. Perera D.W.U., Pfeiffer C. F., Skeie N.-O. Control of temperature and energy consumption in buildings A review// *International journal of Energy and Environment- 2014.- V.5. №4, - P. 471-484*.
5. ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція і кондиціонування». – Київ: Мінрегіонбуд України, 2013.
6. Дешко, В. І. Енергетичні та ексергетичні моделі теплового комфорту людини / В. І. Дешко, Н. А. Буяк // *Актуальні питання енергозбереження як вимога безпеки життєдіяльності : науково-технічний збірник : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 7-8 червня 2018 р.)*. – Київ : Основа, 2018. – С. 147–154.
7. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – Київ: МОЗ України, 1999. – 12 с.
8. Марікуца, У., Мазур, В., Фармага, І. Розроблення методики дослідження параметрів комфортності приміщення в 3D просторі // *Наукові праці Національного університету «Львівська політехніка»*. – Львів, 2012.
9. Fang, L., Clausen, G., Fanger, P.O. Impact of Temperature and Humidity on Perception of Indoor Air Quality. – *Proceedings of AIVC Conference*, 1996.
10. Berglund, L.G., Cain, W.S. Perceived Air Quality and the Thermal Environment. – *Indoor Air*, 1989.

11. Fanger P.O. Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. – McGraw-Hill, 1972.
12. ASHRAE Handbook – Fundamentals (2021). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
13. Марченко О.В., Сіденко О.А. Автоматизація технологічних процесів ОВК. – Харків: НТУ "ХПІ", 2018.
14. Поліщук І.А., Гікало П.В., Шевченко М.Г. Забезпечення оптимального мікроклімату у приміщеннях та енергоефективне керування інженерними системами будівель за допомогою цифрових двійників. – Міністерство освіти України, 2024.
15. Mykytyuk Z., Shymchyshyn O., Zvorskyi A., Markiv D. Автоматизація процесів керування мікрокліматом житлових приміщень // ІСТЕЕ. – 2024. – Вип. 4(1). – С. 155–162.
16. Afram A., Janabi-Sharifi F. Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC). – Building and Environment, 72 (2014): 343–355.
17. Kettler J., Esser P. Humidity Control in Modern HVAC Systems. – ASHRAE Journal, Vol. 59, No. 2, 2017.
18. ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
19. Веденєєв С.М., Лепеха Л.А. Системи вентиляції та кондиціонування повітря: Навч. посіб. – Київ: Арістей, 2015.
20. Versteeg H.K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method. – Pearson, 2007.
21. Kaklauskas A., Zavadskas E.K. Intelligent Building Systems. – Springer, 2009.
22. ISO 13790:2008. Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling.
23. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція будівель.

24. European Commission (2021). *Energy Efficiency in Buildings: Best Practices*.
25. Kalogirou, S.A. (2009). *Artificial Intelligence in Energy and Buildings*. Elsevier.
26. ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment (2020).
27. Killian, M., & Kozek, M. (2016). Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings. *Building and Environment*, 105.
28. Wang, S., & Xu, X. (2006). Demand-based zone-temperature control for energy-efficient buildings. *Energy and Buildings*, 38(5).
29. Злотенко Б.М., Багута І.В., Козоріз М.Г. Комп'ютерна система керування мікрокліматом у приміщенні // Наукові праці КНУТД. – Київ, 2024.
30. Човнюк, Ю. В., Кравчук, В. ., Москвітіна, А. С., & Пефтьєва І. А. . (2021). Використання методу інтегральних співвідношень для аналітичного розв'язку гіперболічних моделей теплопровідності. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 38, 6–16.
31. Kramer R., J. van Schijndel, Schellen H. Simplified thermal and hygric building models: A literature review. *Frontiers of Architectural Research*. – 2012. – № 1(4). – P. 318–325.
32. 15.Perera D.W.U., Pfeiffer C. F., Skeie N.-O. Control of temperature and energy consumption in buildings – A review // *International journal of Energy and Environment*. – 2014. – Vol. 5, Issue 4. – P. 471–484.
33. Collotta M., Messineo A., Nicolosi G. and Pau G. A Dynamic Fuzzy Controller to Meet Thermal Comfort by Using Neural Network Forecasted Parameters as the Input // *Energies*. – 2014. – № 7. – P. 4727–4756; doi:10.3390/en7084727.
34. ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту. [Чинний від 2013-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2012. 74 с.
35. Orosa J. Research on General Thermal Comfort Models. *European Journal of Scientific Research*, 2009. V. 27. P. 217–227.

36. Hakan O. Nilsson. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models. URL: <http://www.arbetslivsinstitutet.se> (дата звернення 26.06.2017).

37. ДСТУ Б EN 15251: 2011. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики будівель. [Чинний від 2013-07-01]. Київ: Мінрегіон України, 2012. 71 с.

38. ДСТУ Б EN 15261: 2012. Розрахунок параметрів мікроклімату. [Чинний від 2013-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2012. 81 с.

39. ДСТУ Б EN 15603: 2013. Енергоефективність будівель. Загальне енергоспоживання та визначення енергетичних показників. [Чинний від 2014-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2014. 63 с.

40. Katic K., Zeiler V., Voxem G. Thermophysiological models: a first comparison. First German – Austrian IBPSA Conference (RWTH Aachen University), 2014. P. 595–602.

41. Gagge A. P., Fobelets A. P., Berglund L. G. A standart predictive index of human response to the thermal enviroment. ASRAE Transactions, 1971. V. 77. P. 247–262.

42. Fanger P. O. Assessment of man's thermal comfort in practice. British Journal of Industrial Medicine, 1973. V 30. P. 313–324.

43. ANSI/ASHRAE Standard 55: 2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE. – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2010. 12 p.

44. Yang L, Yan H., Lam J. Thermal comfort and building energy consumption implications – A review. Applied Energy, 2014. V.115. P. 164–173.

45. Attia S., Carlucci S. Impact of different thermal comfort models on zero energyresidential buildings in hot climate. Energy and Buildings, 2015. V.102. P. 117–128.

46. Zolfagari A. Maererfat M. A new simplified model for evaluating non-uniform thermal sensation caused by wearing clothing. *Building and Environment*, 2010. V. 45. P. 776–783.
47. Schellen L., Loomans M., Kingma B. and other. The use of a thermophysiological model in the built environment to predict thermal sensation : coupling with the indoor environment and thermal sensation. *Building and Environment*, 2013. V. 59. P. 10–22.
48. Shukuya M. *Exergy: Theory and Applications in the Built Environment*. Berlin: Springer, 2013. 374 p.
49. Schweiker M., Kolarik J., Dovjak M., Shukuya M.. Unsteady-state human-body exergy consumption rate and its relation to subjective assessment of dynamic thermal environments. *Energy and Buildings*, 2016. V.116. P. 164–180.
50. Simone A., Kolarik J., Iwamatsu T. et al. A relation between calculated human body exergy consumption rate and subjectively assessed thermal sensation. *Energy and Buildings*, 2011. V. 43. P. 1–9.
51. Mady C., Ferreira M., Yanagihara J., Oliveira S. Jr. Human body exergy analysis and the assessment of thermal comfort conditions. *International journal of heat and mass transfer*, 2014. V. 77. P. 577–584.
52. Iwamatsu. T., Asada H. A Calculation Tool for Human Body Exergy Balance. *Energy Conservation in Buildings and Community Systems. Annex 49 Newsletter: The International Energy Agency*, 2009. V. 6. P. 4–5.
53. *Building Energy Modeling Software | IES Virtual Environment*.
54. Споживання електроенергії конвектора за добу • Noirot Україна.
55. Berger, M., & Worlitschek, J. (2018). A novel approach for estimating residential space heating demand. *Energy*, 159, 294–301.
56. *Oil Heater Room Heating Times Guide (With Size Chart)*. (б. д.). Home Inspection Insider.
57. ISO 7730:2025. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and

PPD indices and local thermal comfort criteria. – Geneva: International Organization for Standardization, 2025.

58. Мінімально допустима температура в приміщеннях цієї зими буде 16 градусів: Денис Шмигаль | ЮРЛІГА. ЮРЛІГА. <https://is.gd/Zf26TR>

59. House heating system. MathWorks. URL: <https://is.gd/PFK6aB>

60. Бойко О.О., Воскобойник Є.К., Чеберячко Ю. Релейний модуль системи дослідження процесу керування тепловим комфортом. Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference «Modern Perspectives on Global Scientific Solutions» (March 3-5, 2025. Bergen, Norway). European Open Science Space, 2025. 311 p.

61. Воскобойник Є.К., Система дослідження процесу керування тепловим комфортом / Є.К. Воскобойник, О.О. Бойко. – Молодь: наука та інновації: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 22–24 листопада 2023 року: у 2-х т. – Дніпро : НТУ «ДП», 2023. Том 1. – с. 447-448.

62. Бойко О.О., Воскобойник Є.К. ЛМІ системи керування тепловим комфортом з використанням електронагрівача. Science and Information Technologies in the Modern World: Collection of Scientific Papers "International Scientific Unity" with Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. February 26-28, 2025. Athens, Greece. 541 p., pp. 51-53.

63. Бойко О.О., Воскобойник Є.К., Чеберячко Ю. Релейний модуль системи дослідження процесу керування тепловим комфортом. Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference «Modern Perspectives on Global Scientific Solutions» (March 3-5, 2025. Bergen, Norway). European Open Science Space, 2025. 311 p., pp. 31-34.

64. О. О. Бойко, Є. К. Воскобойник, Є. В. Кошеленко. Дослідження процесу керування тепловим комфортом у багатокімнатному будинку з використанням децентралізованої системи. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2025. Вип. 12(43), ч. I. 428 с., с. 316-325.

**ДОДАТОК А – Акт впровадження у навчальний процес пакету програмного забезпечення NTU\_DP\_SmartHeaterPMV**

Затверджую

Перший проректор

Національного технічного університету

«Дніпровська політехніка»

к.б.н., д.т.н., проф.



Павличенко А.В.

**АКТ**

**впровадження результатів дисертаційного дослідження в навчальний процес**

Сучасні тенденції розвитку енергетичного сектору України визначають необхідність впровадження інноваційних рішень у сфері енергоефективності, автоматизації та цифровізації інженерних систем будівель. Одним із ключових напрямів є оптимізація процесів теплопостачання з урахуванням вимог до якості мікроклімату, що безпосередньо впливає на комфорт, продуктивність та здоров'я користувачів.

У контексті реалізації положень Енергетичної стратегії України до 2035 року, особливого значення набуває розробка систем керування тепловим комфортом, здатних забезпечити раціональне використання енергоресурсів при дотриманні нормативних показників мікроклімату, визначених міжнародними стандартами, зокрема ISO 7730:2005 / ДСТУ Б EN ISO 7730:2011.

З огляду на високий рівень енергоспоживання будівельного сектору, що становить до 40% загального споживання енергії та третину викидів парникових газів, актуальним є створення інтелектуальних систем керування, здатних адаптувати тепловий режим до індивідуальних потреб користувачів, конструктивних особливостей будівлі та обмежень енергетичної інфраструктури.

Результати дисертаційного дослідження аспіранта кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Воскобойник Є. К. на тему: «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегроване керування автономним електричним опаленням у багатокімнатних будівлях з урахуванням комплексних показників теплового комфорту» впроваджено в навчальний процес підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка».

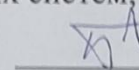
Матеріали дисертації використано при оновленні змісту лекційних та лабораторних занять з дисциплін, що охоплюють питання автоматизації систем керування, а саме в рамках дисциплін «Проектування систем автоматизації», «Проектування автоматичних систем керування технологічними комплексами» та «Автоматизація технологічних процесів виробництва» при підготовці бакалаврів та магістрів.

Впровадження результатів дослідження сприяє підвищенню якості освітнього процесу, формуванню професійних компетентностей здобувачів та актуалізації навчального контенту відповідно до сучасних технологічних тенденцій.

Завідувач кафедру

кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем,

доктор технічних наук, професор

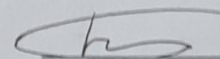


Бубліков А.В.

доцент кафедри

кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем,

кандидат технічних наук



Бойко О.О.